



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ Patentschrift  
⑩ DE 101 32 504 C 1

⑤1 Int. Cl. 7:  
H 01 L 21/302  
B 24 B 37/04

②1 Aktenzeichen: 101 32 504.5-33  
②2 Anmeldetag: 5. 7. 2001  
④3 Offenlegungstag: —  
④5 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 10. 10. 2002

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑦3 Patentinhaber:

Wacker Siltronic Gesellschaft für  
Halbleitermaterialien AG, 84489 Burghausen, DE

⑦4 Vertreter:

Rimböck, K., Dr., 81737 München

⑦2 Erfinder:

Wenski, Guido, Dipl.-Chem. Dr., 84489 Burghausen,  
DE; Altmann, Thomas, Dipl.-Ing. (FH), 84533  
Haiming, DE; Heier, Gerhard, 84489 Burghausen,  
DE; Winkler, Wolfgang, 84529 Tittmoning, DE;  
Kann, Gunther, Dipl.-Phys. Dr., 83556 Griesstätt, DE

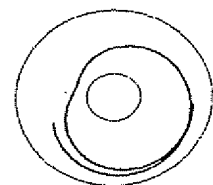
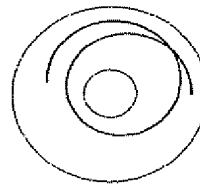
⑤6 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

DE	199 05 737 C2
DE	199 19 583 A1
DE	197 04 546 A1
DE	196 26 396 A1
DE	100 07 390 A1
US	61 80 423 B1
US	58 55 735 A
EP	05 47 894 A1
WO	00 36 637 A1
WO	0 07 230 A1

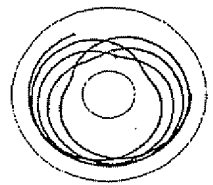
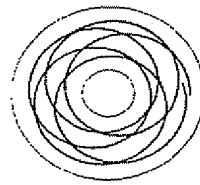
⑤4 Verfahren zur beidseitigen Material abtragenden Bearbeitung von Halbleiterscheiben und seine Verwendung

⑤7 Gegenstand der Erfindung ist ein Verfahren zur gleich-  
zeitig beidseitigen Material abtragenden Bearbeitung von  
Halbleiterscheiben mit einer Vorderseite und einer Rück-  
seite, wobei die Halbleiterscheiben in mittels eines ring-  
förmigen äußeren und eines ringförmigen inneren An-  
triebskranzes in Rotation versetzten Läuferscheiben lie-  
gen und zwischen zwei gegenläufig rotierenden Arbeits-  
scheiben in einer Weise bewegt werden, die sich durch je  
eine Bahnkurve relativ zur oberen Arbeitsscheibe und  
eine Bahnkurve relativ zur unteren Arbeitsscheibe be-  
schreiben lässt, das sich dadurch auszeichnet, dass die  
beiden Bahnkurven nach sechs Schlaufen um das Zen-  
trum ein noch offenes Erscheinungsbild besitzen und an  
jeder Stelle einen Krümmungsradius aufweisen, der min-  
destens so groß ist wie der Radius des inneren Antriebs-  
kranzes.

$n_o = 16 \text{ U/min}; n_u = -13 \text{ U/min}; n_s = 5,4 \text{ U/min}; n_r = -16$

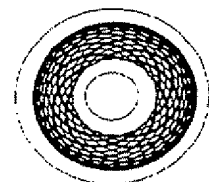
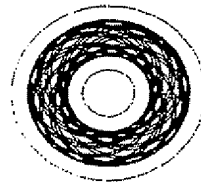


Bahnkurve relativ zum oberen Teller / Bahnkurve relativ zum unteren Teller  
nach 6 sec nach 6 sec



nach 20 sec

nach 20 sec



nach 120 sec

nach 120 sec

DE 101 32 504 C 1

DE 101 32 504 C 1

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur gleichzeitig beidseitigen Material abtragenden Bearbeitung von Halbleiterscheiben ("wafer") unter Verwendung von optimierten Bahnkurven der Halbleiterscheiben relativ zur oberen und unteren Bearbeitungsscheibe.

[0002] Eine typische Prozesskette zur Herstellung von Halbleiterscheiben umfasst die Prozessschritte Sägen, Kantenverrunden, Lappen oder Schleifen, nasschemisches Ätzen, Polieren nebst Reinigungsschritten vor und/oder nach zumindest einigen der aufgeführten Prozessschritte. Insbesondere an Halbleiterscheiben, die als Ausgangsprodukt für die Fertigung moderner Bauelementengenerationen beispielsweise mit Linienbreiten von 0,13 µm oder 0,10 µm Verwendung finden sollen, sind hohe Anforderungen an Planparallelität und Ebenheit gestellt, was sich in den genannten Fällen durch das Ebenheitsmaß  $SFQR_{max}$  gleich oder kleiner 0,13 µm oder 0,10 µm für eine Bauelementfläche von beispielsweise 25 mm × 25 mm ausdrücken lässt. Dieser Anforderung kann Rechnung getragen werden, indem in der Prozesskette mindestens ein Fertigungsschritt als gleichzeitig die Vorderseite und die Rückseite der Halbleiterscheiben bearbeitender Schritt ausgeführt wird. Beispiele für derartige Prozesse sind doppelseitiges Lappen, doppelseitiges Schleifen und doppelseitiges Polieren, die als Einzelscheibenprozess oder unter gleichzeitiger Bearbeitung von etwa 5 bis 30 Halbleiterscheiben ausgeführt werden können.

[0003] Die Technik des doppelseitigen Lappens von gleichzeitig mehreren Halbleiterscheiben ist seit langem bekannt und beispielsweise in der EP 547 894 A1 beschrieben, und es sind geeignete Anlagen in verschiedenen Größen von mehreren Herstellern am Markt erhältlich. Dabei werden die Halbleiterscheiben unter Zuführung einer Abrasivstoffe enthaltenden Suspension zwischen einer oberen und einer unteren Arbeitsscheibe, vom Fachmann als Lappscheibe bezeichnet, die meist aus Stahl besteht und mit Kanälen zur besseren Verteilung der Suspension versehen ist, unter einem gewissen Druck bewegt und dadurch Halbleitermaterial entfernt, wobei sie durch mittels Antriebskränze in Rotation versetzte Läuferscheiben ("carrier") mit Aussparungen zur Aufnahme der Halbleiterscheiben auf einer geometrischen Bahn gehalten werden.

[0004] Aufgaben des Lappens sind, beim Aufsägen des Halbleiterkristalls erzeugte gestörte oberflächennahe Bereiche ("damage") zu entfernen sowie eine vorgegebene Dicke und Planparallelität der Halbleiterscheiben herzustellen. Typische Abträge sind dabei 20 µm bis 120 µm Halbleitermaterial, die sich bevorzugt gleichmäßig auf beide Seiten der Halbleiterscheibe verteilen.

[0005] Verfahren zum doppelseitigen Schleifen von Halbleiterscheiben sind ebenfalls bekannt und kommen in jüngerer Zeit auf Grund von Kostenvorteilen verstärkt an Stelle des Lappens zum Einsatz. In diesem Zusammenhang ist beispielsweise in der DE 196 26 396 A1 ein Verfahren beansprucht, das mehrere Halbleiterscheiben gleichzeitig bearbeitet und mit Bewegungen der Halbleiterscheibe ähnlich denen beim doppelseitigen Lappen arbeitet. Dem doppelseitigen Schleifen kommen dabei die gleichen Aufgaben wie dem Lappen zu; die typischen Abträge sind ebenfalls vergleichbar.

[0006] Das Verfahren der doppelseitigen Politur von Halbleiterscheiben stellt eine Weiterentwicklung des Lappens dar, wobei an Stelle der oberen und unteren Lappscheibe als Arbeitsscheiben mit Poliertuch beklebte planare Polierteller treten und eine meist alkalisch stabilisierte Kolloide enthaltende Poliersuspension zugeführt wird. Gemäß der US 5,855,735 findet ab einer Feststoffkonzentration von 6 Gew.-% ein Übergang von der chemisch-mechanischen doppelseitigen Politur in eine doppelseitige Grobpolitur im Lappmodus statt.

[0007] Wiederum werden die Halbleiterscheiben dabei durch in Rotation versetzte Läuferscheiben bei sich in der Regel gegenläufig drehendem oberen und unteren Polierteller auf einer festgelegten Bahn bewegt. Eine diesbezügliche Poliermaschine ist beispielsweise in der DE 100 07 390 A1 beansprucht. Ein Verfahren zur doppelseitigen Politur von Halbleiterscheiben zur Erzielung hoher Ebenheiten, wobei die fertig polierten Halbleiterscheiben nur um 2 bis 20 µm dicker sind als die Läuferscheiben aus Edelstahl, ist aus der DE 199 05 737 C2 bekannt. Mit diesem Verfahren lassen sich Halbleiterscheiben mit lokalen Ebenheitswerten, ausgedrückt als  $SFQR_{max}$  für ein Raster mit Bauelementflächen von 25 mm × 25 mm, von gleich oder kleiner 0,13 µm erzielen, die für Halbleiterbauelemente-Prozesse mit Linienbreiten gleich oder kleiner 0,13 µm erforderlich sind. Ein Verfahren zur Nacharbeit durch doppelseitige Politur ist in der DE 199 56 250 C1 beschrieben. Zum Schutz der Kante der Halbleiterscheiben verfügen die Läuferscheiben sinnvoller Weise gemäß einer in der EP 208 315 B1 beschriebenen Ausführungsform über mit Kunststoff ausgekleidete Aussparungen zur Aufnahme der Halbleiterscheiben, ein Verfahren, das vielfach auch beim Lappen Anwendung findet.

[0008] Die DE 199 19 583 A1 offenbart ein Verfahren zur beidseitigen Material abtragenden Bearbeitung von Halbleiterscheiben mit einer Vorderseite und einer Rückseite, wobei die Halbleiterscheiben in mittels eines ringförmigen äußeren und eines ringförmigen inneren Antriebskranzes in Rotation versetzten Läuferscheiben liegen und zwischen zwei gegenläufig rotierenden Arbeitsscheiben bewegt werden.

[0009] In der WO 00/07230 A1 ist ein Polierverfahren für Halbleiterscheiben beschrieben, bei dem das Halbleitersubstrat und das Poliertuch in bestimmter Weise rotieren, um einen gleichmäßigen Polierabtrag zu gewährleisten.

[0010] Aufgabe der doppelseitigen Politur sind, die endgültige Planparallelität und Ebenheit der Halbleiterscheibe einzustellen und gestörte Kristallschichten sowie Oberflächenrauigkeiten aus den Vorprozessen, beispielsweise Lappen oder Schleifen gefolgt von Ätzen, zu eliminieren. Die hohe Ebenheit doppelseitig polierter Halbleiterscheiben, gepaart mit dem Vorliegen einer polierten Rückseite mit reduzierter Neigung zur Partikeladhäsion, hat dazu geführt, dass dieses abtragende Polierverfahren insbesondere bei der Herstellung von Halbleiterscheiben der Durchmesser 200 mm und größer von deutlich höherer Bedeutung als die einseitige Politur der Vorderseite ist. Typische Abträge sind dabei 10 µm bis 50 µm Halbleitermaterial.

[0011] Meist wird bei der doppelseitigen Politur gleich viel Material von der Vorderseite und der Rückseite der Halbleiterscheiben abgetragen. In der WO 00/36637 A1 ist dagegen ein Verfahren beansprucht, durch erhöhten Vorderseitenabtrag bei der doppelseitigen Politur, der durch eine erhöhte Drehzahl des oberen Poliertellers realisiert werden kann, gezielt gestörte Kristallschichten auf der Rückseite der Scheibe zu hinterlassen. Gemäß der DE 197 04 546 A1 gelingt ein derartiger asymmetrischer Abtrag auch durch ein mehrstufiges Verfahren doppelseitige Politur, Beschichtung der Rückseite beispielsweise mit Oxid, erneute doppelseitige Politur.

[0012] Um als Hersteller von Halbleiterscheiben wettbewerbsfähig zu bleiben, ist es vordringlich, Prozesse und Verfahren bereitzustellen, die eine Fertigung geförderter Qualitäten zu möglichst niedrigen Kosten ermöglichen. Ein wichtiger Ansatzpunkt hierbei ist, die Ausbringung an Halbleiterscheiben pro Maschine auf das höchstmögliche Maß zu steigern. Im Falle der doppelseitigen Politur bedeutet dies beispielsweise, hohe Abtragsraten gepaart mit einer hoher Standzeit der Poliertücher zu realisieren. Für die doppelseitig arbeitenden Läpp- und Schleifverfahren gilt Analoges, wobei im Falle der Arbeitsscheiben an Stelle der Lebensdauer der Poliertücher diejenige der Läppscheiben beziehungsweise der Schleifkörper tritt.

[0013] Nachteil dieser Verfahren nach dem Stand der Technik ist, dass es beim doppelseitigen Läppen, Schleifen und Polieren nicht möglich ist, unter Einhaltung bestimmter Produkteigenschaften, beispielsweise hohe Ebenheit und/oder Abwesenheit von Oberflächenkratzern, einen erhöhten Maschinendurchsatz beziehungsweise eine verkürzte Zykluszeit bei festgelegtem Materialabtrag zu realisieren. Versuche, die Abtragsrate an Halbleitermaterial durch Erhöhung des Bearbeitungsdrucks zu steigern, führen zu einer Verschlechterung der Ebenheiten und/oder zum Auftreten von Oberflächenkratzern, womit die so produzierten Scheiben nicht weiterverarbeitet werden können sondern verworfen oder unter erhöhtem Kostenaufwand nachgearbeitet werden müssen.

[0014] In der US 6,180,423 B1 ist beschrieben, dass im Falle der einseitigen Politur von nur einer Halbleiterscheibe, die von einem Träger gehalten und um ihr Zentrum drehend über einen ebenfalls rotierenden Polierteller bewegt wird, ihre Bahnkurve relativ zum Poliertuch vom Verhältnis der Rotationsgeschwindigkeiten von Polierteller  $m$  und Träger  $n$  abhängt; beansprucht ist eine möglichst gleichmäßige Bedeckung des Poliertuchs durch diese spiralförmige Bahnkurve, was durch ein möglichst hohes kleinstes gemeinsames Vielfaches von  $m$  und  $n$  erreicht wird. Als Vorteil wurden eine nachhaltig höhere Abtragsrate und eine verlängerte Lebensdauer des Poliertuchs festgestellt. Auch dieses Verfahren schließt die oben genannte Lücke im Stand der Technik nicht, da eine Anwendung auf beidseitig arbeitende Abtragsverfahren nicht möglich ist, bei der eine Rotation der Läuferscheibe durch eine Translation um das Maschinenzentrum relativ zu den Poliertellern überlagert ist und daher 4 statt 2 Freiheitsgrade (Drehzahlen oberer und unterer Teller, Drehzahlen innerer und äußerer Antrieb der Läuferscheiben) beachtet werden müssen.

[0015] Es war daher die Aufgabe gestellt, ein Verfahren zur gleichzeitig beidseitigen Material abtragenden Bearbeitung von Halbleiterscheiben beispielsweise durch Läppen, Schleifen oder Polieren zu entwickeln, das über eine höhere Ausbringung von Halbleiterscheiben festgelegter Qualität pro Bearbeitungsmaschine zu Kostenvorteilen führt.

[0016] Gegenstand der Erfindung ist ein Verfahren zur gleichzeitig beidseitigen Material abtragenden Bearbeitung von Halbleiterscheiben (H) mit einer Vorderseite und einer Rückseite, wobei die Halbleiterscheiben (H) in mittels eines ringförmigen äußeren (6) und eines ringförmigen inneren (5) Antriebskranzes in Rotation versetzten Läuferscheiben (1) liegen und zwischen zwei gegenläufig rotierenden Arbeitsscheiben (7) in einer Weise bewegt werden, die sich durch je eine Bahnkurve eines Punktes (P) der Halbleiterscheiben relativ zur oberen Arbeitsscheibe und eine Bahnkurve dieses Punktes relativ zur unteren Arbeitsscheibe beschreiben lässt, das dadurch gekennzeichnet ist, dass die beiden Bahnkurven

- (a) nach sechs Schlaufen um die Zentrumsachse (M) der Poliermaschine ein noch offenes Erscheinungsbild besitzen und
- (b) an jeder Stelle einen Krümmungsradius aufweisen, der mindestens so groß ist wie der Radius ( $r_i$ ) des inneren Antriebskranzes (5).

[0017] Anders ausgedrückt sind die beiden Bahnkurven nach gleich oder kleiner sechs Schlaufen um das Zentrum nicht in sich geschlossen oder nicht nahezu in sich geschlossen und sie weisen an keiner Stelle einen Krümmungsradius auf, der kleiner als der des inneren Antriebskranzes ist.

[0018] Die Bahnkurven der Erfindung unterscheiden sich in ihrer Form von den streng spiralförmigen Kurven der einseitigen Politur nach dem Stand der Technik dadurch, dass durch Antrieb der Läuferscheiben und Antrieb der Arbeitsscheiben mehrere Bewegungen überlagert sind. Ein wesentliches Merkmal der Erfindung ist es, dass nicht nur eine gleichmäßige Bedeckung sowohl der oberen als auch der unteren Arbeitsscheibe mit der Bahnkurve der Halbleiterscheibenbewegung relativ zur Arbeitsscheibe vorhanden ist, sondern auch abrupte Richtungswechsel unterbleiben. Während beispielsweise bei der doppelseitigen Politur durch die erste Forderung eine gleichmäßige Abnutzung und schnelle Regeneration des oberen und des unteren Poliertuchs gewährleistet ist, wird durch die zweite Forderung eine unsanfte Fahrweise der Halbleiterscheiben vermieden, die zur Schwingung der Läuferscheibe und/oder Verkipfung der Halbleiterscheibe mit dem Risiko schlechter Ebenheiten bis hin zum Bruch der Halbleiterscheibe durch Verlassen der Läuferscheibe führen kann. Diese Zusammenhänge sind überraschend und waren nicht vorhersehbar. Für das doppelseitige Läppen und Schleifen gelten analoge Betrachtungsweisen, wie sie für das doppelseitige Polieren ausgeführt wurden.

[0019] Ausgangsprodukt des Verfahrens ist eine Halbleiterscheibe, die auf bekannte Weise von einem Kristall abgetrennt und kantenverrundet und gegebenenfalls weiteren Prozessschritten unterworfen wurde. Sie kann, je nach Verfahren und Zielsetzung, eine gesägte, geläppte, geschliffene, geätzte, polierte oder epitaxierte Oberfläche besitzen. Falls dies gewünscht wird, kann die Kante der Halbleiterscheibe poliert sein.

[0020] Endprodukt des Verfahrens ist eine Halbleiterscheibe, die doppelseitig geläppt, geschliffen oder poliert ist, eine hohe Ebenheit und Kratzerfreiheit besitzt und den nach dem Stand der Technik hergestellten Halbleiterscheiben gleicher Qualität bezüglich ihrer Herstellkosten überlegen ist.

[0021] Das erfindungsgemäße Verfahren kann zur doppelseitigen Bearbeitung verschiedenartiger scheibenförmiger Körper beispielsweise durch Läppen, Schleifen und Polieren eingesetzt werden, die aus einem Material bestehen, welches durch die genannten Verfahren bearbeitbar ist. Derartige Materialien sind beispielsweise Gläser, etwa auf Siliciumdioxid-Basis, und Halbleiter, etwa Silicium, Silicium/Germanium und Galliumarsenid, Silicium in einkristalliner zur Weiterverwendung in der Fertigung von elektronischen Bauelementen, beispielsweise Prozessoren und Speicherelementen, ist im Rahmen der Erfindung besonders bevorzugt.

[0022] Das Verfahren eignet sich besonders zur Bearbeitung von Halbleiterscheiben mit Durchmessern von gleich oder größer 200 mm und Dicken von 500  $\mu\text{m}$  bis 1200  $\mu\text{m}$ . Diese können entweder direkt als Ausgangsmaterial für die Her-

stellung von Halbleiterbauelementen eingesetzt werden oder nach Durchführung weiterer Prozessschritte wie nasschemisches oder Plasmaätzen, Polieren und/oder nach Aufbringen von Schichten wie Rückseitenversiegelungen oder einer epitaktischen Beschichtung der Scheibenvorderseite und/oder nach Konditionierung durch eine Wärmebehandlung ihrem Bestimmungszweck zugeführt werden. Neben der Herstellung von Scheiben aus einem homogenen Material kann die Erfindung natürlich auch zur Herstellung von mehrschichtig aufgebauten Halbleitersubstraten wie SOI-Scheiben (silicon-on-insulator) eingesetzt werden.

[0023] Die weitere Beschreibung des Verfahrens erfolgt am Beispiel der doppelseitigen Politur von Siliciumscheiben. Die Angaben zur Berechnung und Festlegung der optimierten Bahnkurven sind für den Fachmann problemlos auf Verfahren mit analoger kinematischer Wirkungsweise wie doppelseitiges Läppen oder Schleifen übertragbar, wenn beispielsweise statt mit Poliertuch belegte Polierteller mit Kanälen oder Schleifkörpern ausgestattete Arbeitsscheiben zum Einsatz kommen und statt von einer Abnutzung des Poliertuchs von einer Abnutzung der Läpp- oder Schleifscheibe gesprochen wird.

[0024] Prinzipiell ist es möglich, eine Anzahl beispielsweise durch ein Innenloch- oder Drahtsägeverfahren gesägter Siliciumscheiben direkt dem erfindungsgemäßen doppelseitigen Polierschritt zu unterziehen. Es ist jedoch bevorzugt, die scharf begrenzten und daher mechanisch sehr empfindlichen Scheibenkanten mit Hilfe einer geeignet profilierten Schleifscheibe zu verrunden. Weiterhin ist es zwecks Verbesserung der Geometrie und teilweisem Abtrag der zerstörten Kristallschichten bevorzugt, die Siliciumscheiben abtragenden Schritten wie Läppen und/oder Schleifen und/oder Ätzen zu unterziehen, wobei alle genannten Schritte nach dem Stand der Technik ausgeführt werden.

[0025] Zur Durchführung des erfindungsgemäßen Polierschrittes kann eine handelsübliche Maschine zur doppelseitigen Politur geeigneter Größe verwendet werden, welche die gleichzeitige Politur von mindestens drei Siliciumscheiben unter Verwendung von mindestens drei Läuferscheiben ermöglicht. Besonders bevorzugt ist der gleichzeitige Einsatz von drei bis fünf Läuferscheiben, die mit jeweils mindestens drei in gleichen Abständen auf einer kreisförmigen Bahn angeordneten Siliciumscheiben belegt sind. Jedoch ist auch die Belegung jeder Läuferscheibe mit nur jeweils einer Siliciumscheibe möglich, die, um die Erfindung umsetzen zu können, jedoch azentrisch in der Läuferscheibe angeordnet sein sollte.

[0026] Die Poliermaschine besteht im Wesentlichen aus einem frei horizontal drehbaren unteren Polierteller und einem frei horizontal drehbaren oberen Polierteller, die jeweils beide mit Poliertuch bedeckt, bevorzugt beklebt sind, und erlaubt unter kontinuierlicher Zuführung eines Poliermittels geeigneter chemischer Zusammensetzung das doppelseitige abtragende Polieren. Die Läuferscheiben, die bevorzugt aus rostfreiem Chromstahl bestehen, verfügen über geeignet dimensionierte, mit Kunststoff ausgekleidete Aussparungen zur Aufnahme der Siliciumscheiben und sind beispielsweise mit einer Triebstock-Stiftverzahnung oder einer Evolventenverzahnung mit der Poliermaschine über einen sich drehenden inneren und einen sich gegenläufig drehenden äußeren Stift- oder Zahnkranz in Kontakt und werden dadurch in eine rotierende Bewegung zwischen den beiden gegenläufig rotierenden Poliertellern versetzt. Die Triebstock-Stiftverzahnung ist wegen des ruhigeren Laufverhaltens der Läuferscheiben und der einfachen Austauschbarkeit der Stifte besonders bevorzugt.

[0027] Die Läuferscheiben für das erfindungsgemäße Polierverfahren besitzen eine bevorzugte Dicke von 500 bis 1200 µm, die sich nach der Enddicke der polierten Siliciumscheiben richtet, welche letztlich vom Durchmesser der Siliciumscheiben und vom geplanten Anwendungszweck abhängt. Im Hinblick auf die Herstellung sehr ebener Siliciumscheiben ist bevorzugt, dass die Enddicke der polierten Scheiben um 2 bis 20 µm größer ist als die Läuferscheibendicke, wobei der Bereich von 3 bis 10 µm besonders bevorzugt ist. Der Siliciumabtrag durch die doppelseitige Politur beträgt bevorzugt 2 bis 70 µm und besonders bevorzugt 5 bis 50 µm.

[0028] Zur Beschreibung der Erfindung gehören Figuren, welche diese verdeutlichen. In den Zeichnungen markierte Größen sind in den nachfolgenden Betrachtungen zu den Bahnkurven fett aufgeführt. Alle Angaben beziehen sich auf die Politur von Siliciumscheiben des Durchmessers 300 mm auf einer handelsüblichen Doppelseiten-Poliermaschine des Typs AC2000 von Fa. Peter Wolters, Rendsburg (Deutschland), ausgestattet mit Stiftverzahnung des äußeren und inneren Kranzes zum Antrieb der Läuferscheiben. Die der Erfindung zu Grunde liegenden Zusammenhänge lassen sich analog auf kleinere oder größere Poliermaschinen sowie Läpp-, Schleif- und sonstige mit vergleichbarer Kinematik arbeitende Abtragsmaschinen und auf die Bearbeitung von kleineren oder größeren Halbleiterscheiben übertragen; die Figuren beinhalten daher in keinem Fall eine Einschränkung der Erfindung.

[0029] Fig. 1 zeigt eine Läuferscheibe mit einem Durchmesser von 720 mm zur Aufnahme von drei 300-mm-Siliciumscheiben für die doppelseitige Politur.

[0030] Fig. 2 zeigt die Anordnung von mehreren der in Fig. 1 dargestellten Läuferscheiben in einer Doppelseiten-Poliermaschine, wobei der Durchmesser der äußeren Stiftkranzes 1970 mm und der des inneren Stiftkranzes 530 mm beträgt.

[0031] Fig. 3 zeigt die bei gleichzeitiger Rotation von oberem und unterem Polierteller sowie äußerem und innerem Stiftkranz für die Bewegung einer Siliciumscheibe relativ zum Poliertuch relevanten geometrischen Verhältnisse in einer Doppelseiten-Poliermaschine gemäß Fig. 2.

[0032] Fig. 4 zeigt die Bahnkurve einer Siliciumscheibe während der doppelseitigen Politur auf der in Fig. 2 gezeigten Poliermaschine relativ zum oberen (links) und unteren Poliertuch (rechts) nach 6 sec, 20 sec und 120 sec Laufzeit für die im Vergleichsbeispiel 1 eingestellten Rotationsparameter in einem kartesischen Koordinatensystem. Horizontal aufgetragen ist, wie allgemein üblich, die x-Achse, vertikal aufgetragen die y-Achse. Die Punkte (x, y) im rechten oberen Quadranten besitzen positive Vorzeichen.

[0033] Fig. 5 entspricht Fig. 4 für Vergleichsbeispiel 2.

[0034] Fig. 6 entspricht Fig. 4 für Vergleichsbeispiel 3.

[0035] Fig. 7 entspricht Fig. 4 für Beispiel 1.

[0036] Fig. 8 entspricht Fig. 4 für Beispiel 2.

[0037] Fig. 9 entspricht Fig. 4 für Beispiel 3.

[0038] Die in Fig. 1 dargestellte Läuferscheibe für die doppelseitige Politur 1 ist gekennzeichnet durch eine äußere

Verzahnung 2, die mit den Stiften des äußeren und des inneren Stiftkranzes der Poliermaschine in Eingriff treten können. Sie weist darüber hinaus mit Kunststoff ausgekleidete Öffnungen 3 zur Aufnahme der zu polierenden Siliciumscheiben sowie zusätzliche Öffnungen 4 auf, die eine bessere Verteilung des Poliermittels zwischen den beiden Poliertüchern gewährleisten.

[0039] Fig. 2 zeigt die typische maximale Belegung einer Poliermaschine des Typs AC2000 mit Läuferscheiben 1, die mit jeweils drei Halbleiterscheiben II, in diesem Falle Siliciumscheiben, des Durchmessers 300 mm belegt sind. Eine analoge geometrische Anordnung ergibt sich beispielsweise auch, wenn eine Poliermaschine des kleineren Typs AC1500, ebenfalls hergestellt von Fa. Peter Wothers, mit 200-mm-Halbleiterscheiben belegt wird. Die Läuferscheiben 1 werden durch einen inneren Stiftkranz 5 und einen äußeren Stiftkranz 6 in Rotation versetzt, wobei die Drehrichtungen von 5 und 6 bevorzugt unterschiedliche Vorzeichen besitzen. Die Halbleiterscheiben II sind dabei im Kontakt mit dem Poliertuch eines sich drehenden oberen Poliertellers und eines sich bevorzugt gegenläufig drehenden unteren Poliertellers 7, die in der Aufsicht deckungsgleich sind.

[0040] Fig. 3 enthält Angaben, die zur Herleitung der geometrischen Verhältnisse während des doppelseitigen Polierens von Bedeutung sind. Dabei drehen sich die Stiftkranze 5 und 6 sowie die beiden Polierteller 7 um die feste Zentrumschse der Poliermaschine M, während sich die Läuferscheiben 1 um ihr eigenes Zentrum M' drehen, das nicht ortsfest sein muss. Folgende Rotationskennzahlen (angegeben beispielsweise in U/min = Umdrehungen pro Minute) sind in diesem Zusammenhang von Bedeutung:

$n_o$  = Drehzahl oberer Polierteller 7 um M

$n_u$  = Drehzahl unterer Polierteller 7 um M

$n_a$  = Drehzahl äußerer Stiftkranz 6 um M

$n_i$  = Drehzahl innerer Stiftkranz 5 um M

$n_{LSrot}$  = Drehzahl Läuferscheibe 1 um M'

$n_{LStrans}$  = Drehzahl Läuferscheibe 1 um M

[0041] Vom Maschinenbetreiber frei wählbar sind dabei  $n_o$  und  $n_u$  sowie zwei der vier Größen  $n_a$ ,  $n_i$ ,  $n_{LSrot}$  und  $n_{LStrans}$ . Dies ergibt sich aus den geometrischen Relationen

$$n_a = (r_{LS}/r_a) \times n_{LSrot} + n_{LStrans} \quad (1)$$

$$\text{und } n_i = (r_{LS}/r_i) \times n_{LSrot} + n_{LStrans} \quad (2)$$

oder nach Umformung von (1) und (2)

$$n_{LSrot} = (n_a - n_i)/(r_{LS}/r_a + r_{LS}/r_i) \quad (3)$$

$$\text{und } n_{LStrans} = (r_a \times n_a + r_i \times n_i)/(r_a + r_i) \quad (4)$$

mit  $r_{LS}$  = Radius der Läuferscheibe 1

$r_a$  = Radius des äußeren Stiftkranzes 6

$r_i$  = Radius des inneren Stiftkranzes 5.

[0042] Für eine Maschine des Typs AC2000

$$\text{wird (3) zu } n_{LSrot} = 0,5801 \times (n_a - n_i) \quad (5)$$

$$\text{und (4) zu } n_{LStrans} = 0,7880 \times n_a + 0,2120 \times n_i \quad (6).$$

[0043] Es sei nun die Bahnkurve eines Punktes P im Abstand a vom Zentrum M' der Läuferscheibe 1 relativ zum oberen Poliertuch 7 betrachtet. Dieser Punkt P kann der Mittelpunkt der Halbleiterscheiben II sein, wenn diese alle im gleichen Abstand um den Punkt M' angeordnet sind. Bevorzugt ist P ein Punkt auf einem Kreis um M', der am dichtesten mit Halbleitermaterial belegt ist, um der Beanspruchung des Poliertuchs Rechnung zu tragen. Im beschriebenen Fall der Verwendung von Läuferscheiben 1 auf einer Poliermaschine AC2000 wurde der Radius dieses Kreises a mit 200 mm angenommen.

[0044] Durch Abrollen der Läuferscheibe 1 auf entlang des äußeren Stiftkranzes 6 würde der reale Punkt P zunächst in den fiktiven Punkt P' übergehen, der sich in einem Winkel  $\varphi$  in Bezug auf M von P befindet. Diese Bewegung lässt sich als Hypozykloidenbahn auffassen und in einem kartesischen Koordinatensystem durch die dem Fachmann bekannten Formeln

$$x = (r_a - r_{LS}) \times \cos\varphi + a \times \cos[\varphi \times (r_a - r_{LS})/r_{LS}] \quad (7)$$

$$\text{und } y = (r_a - r_{LS}) \times \sin\varphi - a \times \sin[\varphi \times (r_a - r_{LS})/r_{LS}] \quad (8)$$

beschreiben. (Wegen  $r_a - r_{LS} = r_i + r_{LS}$  ist im gewählten Fall auch eine Beschreibung mittels der Gleichungen für eine Epizykloidenbahn möglich, wobei die Läuferscheibe um den inneren Stiftkranz abgerollt wird.)

[0045] Während der Punkt P durch einen Ausschnitt  $\varphi$  der Hypozykloidenbahn in den Punkt P' überführt wird, dreht sich beispielsweise der obere Polierteller in Gegenrichtung um den Winkel  $-\tau_o$ , was zur Rotation des Punktes P' um M um den Winkel  $\tau_o$  (= "Translation" von M' auf einer Kreisbahn um M) und damit zum Punkt P' führt. Um die Lage des Punktes P' relativ zum Ausgangspunkt P bezogen auf den oberen Polierteller nach einer Zeiteinheit t berechnen zu können, müssen zunächst die Zeiten zur Abwicklung der Winkel  $\varphi$  und  $\tau_o$ , ins Verhältnis gesetzt werden. Dazu sei der äußere Antriebskranz als Referenzkreis angenommen, der sich fiktiv nicht bewegen soll:

$$n_a' = n_a \quad n_a = 0$$

$$\rightarrow n_o' = n_o \quad n_a \quad (9)$$

5

$$n_i' = n_i \quad n_a \quad (10)$$

$$n_{L,Strans}' = n_{L,Strans} \quad n_a \quad (11)$$

$$10 \quad n_{L,Strot}' = n_{L,Strot} \quad (12)$$

$$\text{Dann ist } \tau_o = -n_o' \times t \quad (13)$$

(beziehungsweise  $\tau_o = -n_i' \times t$ ; negative Vorzeichen wegen unterschiedlicher Drehrichtung von  $n_o$  oder  $n_i$  und  $\tau_o$  oder  $\tau_i$ )

15

$$\text{und } \varphi = n_{L,Strans}' \times t \quad (14).$$

$$\text{Mit (9) folgt } \tau_o = (n_a - n_o) \times t \quad (15);$$

20

Einsetzen von (11) und (14) in (1) ergibt

$$\varphi = -(r_{LS}/r_a) \times n_{L,Strot} \times t \quad (16).$$

[0046] Gleichsetzen von (15) und (16) über  $t$  ergibt

25

$$\tau_o = (n_o - n_a) \times \varphi \times r_a / (n_{L,Strot} \times r_{LS}) \quad (17).$$

[0047] Während also vom Punkt P auf Grund der Hypozykloidenbewegung (Gleichungen (7) und (8)) um M der Winkel  $\varphi$  zurückgelegt wird, findet gleichzeitig eine Drehbewegung  $\tau_o$  relativ zum oberen Polierteller statt, die gemäß Gleichung (17) als Funktion von  $\varphi$  beschrieben werden kann. Eine Superposition der beiden Bewegungen kann durch Drehung des die Hypozykloidenbewegung beschreibenden Koordinatensystems  $x - y$  um  $-\tau_o$  in ein Koordinatensystem  $x' - y'$  erfolgen:

30

$$x' = x \times \cos(-\tau_o) + y \times \sin(-\tau_o) \quad (18)$$

35

$$y' = -x \times \sin(-\tau_o) + y \times \cos(-\tau_o) \quad (19)$$

[0048] Die Gesamtbewegung  $P \rightarrow P''$  lässt sich nunmehr durch Einsetzen von (7), (8) und (17) in (18) und (19) beschreiben:

40

$$x' = x \times \cos(-\tau_o) + y \times \sin(-\tau_o) \quad (18)$$

$$\rightarrow x' = [(r_a - r_{LS}) \times \cos\varphi + a \times \cos\{\varphi \times (r_a - r_{LS}/r_{LS})\}] \times \cos(-\tau_o) + \{(r_a - r_{LS}) \times \sin\varphi - a \times \sin[\varphi \times (r_a - r_{LS})/r_{LS}]\} \times \sin(-\tau_o)$$

45

$$x' = [(r_a - r_{LS}) \times \cos\varphi + a \times \cos\{\varphi \times (r_a - r_{LS})/r_{LS}\}] \times \cos[-(n_o - n_a) \times \varphi \times r_a / (n_{L,Strot} \times r_{LS})] + \{(r_a - r_{LS}) \times \sin\varphi - a \times \sin[\varphi \times (r_a - r_{LS})/r_{LS}]\} \times \sin[-(n_o - n_a) \times \varphi \times r_a / (n_{L,Strot} \times r_{LS})] \quad (20)$$

$$y' = -x \times \sin(-\tau_o) + y \times \cos(-\tau_o) \quad (19)$$

50

$$y' = [-(r_a - r_{LS}) \times \cos\varphi - a \times \cos\{\varphi \times (r_a - r_{LS})/r_{LS}\}] \times \sin(-\tau_o) + \{(r_a - r_{LS}) \times \sin\varphi - a \times \sin[\varphi \times (r_a - r_{LS})/r_{LS}]\} \times \cos(-\tau_o)$$

$$y' = [-(r_a - r_{LS}) \times \cos\varphi - a \times \cos\{\varphi \times (r_a - r_{LS})/r_{LS}\}] \times \sin[-(n_o - n_a) \times \varphi \times r_a / (n_{L,Strot} \times r_{LS})] + \{(r_a - r_{LS}) \times \sin\varphi - a \times \sin[\varphi \times (r_a - r_{LS})/r_{LS}]\} \times \cos[-(n_o - n_a) \times \varphi \times r_a / (n_{L,Strot} \times r_{LS})] \quad (21)$$

55

[0049] Dabei entspricht  $(x', y')$  den Koordinaten des Punktes  $P''$  nach Durchlaufen des Winkels  $\varphi$  durch die Hypozykloidenbahn. Für  $\varphi = 0$  ergibt sich  $x' = r_a - r_{LS} + a$  und  $y' = 0$ .

[0050] Die mittlere Geschwindigkeit  $v_o$  ( $v_u$ ) der Punktes P relativ zum oberen (beziehungsweise unteren) Polierteller lässt sich aus der Wegstrecke des Punktes  $(x', y')$

60

$$s = \sum [(x_j' - x_i')^2 + (y_j' - y_i')^2]^{1/2} \quad (22)$$

und Gleichung (16), aufgelöst nach der Zeit  $t$ ,

65

$$t = \varphi \times r_a / (r_{LS} \times n_{L,Strot}) \quad (16)$$

zu  $v = s/t$  (beziehungsweise  $v_o = s_o/t$  und  $v_u = s_u/t$ )

$$v = (\tau_{1,5} \times n_{1,5,rot} / (\varphi \times r_s) \times \Sigma[(x_j' - x_i')^2 + (y_j' - y_i')^2])^{1/2} \quad (23)$$

berechnen, wenn die Wegstrecke  $s$  aus der Summe der Abstände  $(x_j, y_j)$  und  $(x_i, y_i)$  für Winkel  $> 360^\circ$  kleine Winkelinkremente  $\Delta\varphi$ , beispielsweise in Abständen von  $1^\circ$ , unter Verwendung der Gleichungen (20) und (21) aufsummiert wird. Auch die Berechnung von Geschwindigkeitsänderungen ist möglich.

**[0051]** Mit Hilfe der aufgeführten Berechnungsformeln (20), (21) und (23) gelingt die Berechnung von Bahnkurven und Geschwindigkeiten mit einem handelsüblichen Tabellenkalkulationsprogramm auf jedem hinreichend leistungsstarken Tischrechner ("PC").

**[0052]** Theoretisch können für die Drehzahlen  $n_o$ ,  $n_u$ ,  $n_a$  und  $n_i$  und der daraus resultierenden mittleren Relativgeschwindigkeiten  $v_o$  und  $v_u$  sowie den Polierdruck  $P$  beliebige Kombinationen gewählt werden. Allerdings sind den Möglichkeiten in der Praxis Grenzen gesetzt, die vor allem durch Maschinenauslegung, Materialbeanspruchung und Sicherheitsaspekte bedingt sind. Bevorzugt ist eine unterschiedliche Drehrichtung des oberen und unteren Tellers sowie des äußeren und inneren Antriebskranzes, was sich in den Vorzeichen äußert. Für die gleichzeitige Politur von 15 Siliciumscheiben des Durchmessers 300 mm auf einer Poliermaschine AC2000 sind folgende besonders bevorzugte Parameterbereiche sinnvoll und im Produktionsbetrieb beherrschbar und waren Gegenstand der ausführlichen Untersuchungen, die zur Erfindung geführt haben:

$n_o = +10 \dots +25$  U/min  
 $n_u = -10 \dots -26$  U/min  
 $v_o = -0,5 \dots -2,0$  m/sec  
 $v_u = +0,5 \dots +2,0$  m/sec  
 $n_a = +3 \dots +10$  U/min  
 $n_i = -10 \dots -26$  U/min  
 $P = 0,10 \dots 0,25$  bar

**[0053]** Unter diesen Bedingungen ergaben sich Silicium-Abtragsraten zwischen 0,4 und 2,0  $\mu\text{m}/\text{min}$ . Bevorzugt im Rahmen der Erfindung sind Abtragsraten zwischen 0,65 und 1,8  $\mu\text{m}/\text{min}$  um ausreichend hohe Maschinendurchsätze zu gewährleisten; besonders bevorzugt sind Abtragsraten zwischen 0,8 und 1,5  $\mu\text{m}/\text{min}$ .

**[0054]** Ein theoretischer Ansatz zum Verständnis des Polierens, der gleichermaßen auch auf jedes andere Material abtragende Verfahren anwendbar sein sollte, besagt, dass die Abtragsrate proportional zum Polierdruck  $P$  und zur Relativgeschwindigkeit Siliciumscheibe/Poliertuch  $v$  sein sollte (Preston-Gleichung). Demnach sollte es möglich sein, die Abtragsrate bei konstanten Rotationsverhältnissen durch Erhöhung des Drucks zu erhöhen oder bei gleicher Relativgeschwindigkeit, aber einer unterschiedlichen Kombination von Rotationsparametern zum gleichen Polierergebnis zu gelangen.

**[0055]** Insbesondere bei doppelseitig arbeitenden Verfahren, beispielsweise der doppelseitigen Politur, ist diese Gleichung nur bedingt anwendbar, da Steigerungen der Abtragsrate durch Erhöhung von  $P$  und/oder  $v_o/v_u$  oft mit einer Verschlechterung der Ebenheit, ausgedrückt beispielsweise als  $\text{SFQR}_{\text{max}}$ , oder einer Erhöhung der Kratzerrate, beispielsweise durch Materialablagerung auf den Poliertüchern, einhergehen. Daher wurden im Rahmen der Erfindung optimale Kombinationen von Bahnkurven und Drücken gesucht.

**[0056]** Es zeigte sich unter Anwendung der Gleichungen (20), (21) und (23), dass durch verschiedene Kombinationen der Parameter  $n_o$ ,  $n_u$ ,  $n_a$  und  $n_i$  die unterschiedlichsten Bahnkurven des Punktes  $P$  relativ zum oberen beziehungsweise unteren Poliertuch sowie verschiedene Relativgeschwindigkeiten erzeugt werden können. Einige Beispiele sind in den Fig. 4 bis 9 abgebildet. Prinzipiell kann man zwischen so genannten offenen Bahnkurven (Fig. 4 sowie 7 bis 9) und nach nur wenigen Schleifen geschlossenen Bahnkurven (Fig. 5 und 6) unterscheiden. Bei den offenen Bahnkurven wiederum kann man zwischen Kurven mit relativ schwach ausgeprägten Krümmungen (Fig. 7 bis 9) und starken Krümmungen (Fig. 4 rechts) unterscheiden.

**[0057]** Geschlossene Bahnkurven tauchen bei Variation der Drehzahlen in den angegebenen Bereichen periodisch auf. Beispielsweise für  $n_a = 5,4$  U/min und  $n_i = -16$  U/min findet man sie im Bereich von folgenden Tellerdrehzahlen:

Doppelschleife:  $n_o = 25,69$  U/min und  $n_u = -23,96$  U/min  
 3er-Schleife:  $n_o = 19,48$  U/min und  $n_u = -17,75$  U/min  
 4er-Schleife:  $n_o = 17,41$  U/min und  $n_u = -15,69$  U/min  
 5er-Schleife:  $n_o = 16,38$  U/min und  $n_u = -14,65$  U/min  
 6er-Schleife:  $n_o = 15,76$  U/min und  $n_u = -14,03$  U/min  
 einfache Schleife:  $n_o = 13,28$  U/min und  $n_u = -11,55$  U/min  
 3er-Rosette:  $n_o = 10,17$  U/min

**[0058]** Einfache Schleifen sind in Fig. 5 abgebildet, 3er- und 4er-Schleifen in Fig. 6.

**[0059]** Die Bewegung der Siliciumscheiben relativ zum oberen und unteren Poliertuch, ausgedrückt durch die Bewegung des Punktes  $P \rightarrow P'$ , auf geschlossenen Bahnkurven hat eine ungleichmäßige Beanspruchung des Poliertuchs zur Folge. Zum einen relaxiert das Tuch auf diesen Bahnen nach der Kompression während des Poliervorgangs nicht ausreichend, bevor es mit den nächsten Siliciumscheibe überstrichen wird, was zu Lasten der erzielbaren Ebenheit der Scheibe geht. Zum anderen findet auf den Bahnen höchster Belastung eine bevorzugte Ablagerung von abpoliertem Silicium oder seiner Reaktionsprodukte statt, was der Fachmann an sinkenden Abtragsraten und teilweise an der Bildung von braunen Streifen auf dem Poliertuch erkennt, die in verkratzten Oberflächen der Siliciumscheiben mündet. Diese Effekte kommen vor allem dann zum Tragen, wenn zwecks Erzielung höherer Abtragsraten eine Steigerung des Polierdrucks von beispielsweise 0,10 bis 0,15 bar auf 0,18 bis 0,25 bar durchgeführt wird.

**[0060]** Im Rahmen der Untersuchungen zur Erzielung der Erfindung haben wir festgestellt, dass eine Erhöhung des Polierdrucks ohne nennenswerten negativen Einfluss auf Geometrie und Polierkratzer dann erzielt wird, wenn geschlossene Bahnkurven, wie in den Fig. 5 und 6 abgebildet, oder nahezu geschlossene Bahnkurven verwendet werden, deren Schleifenanzahl bei gleich oder kleiner sechs liegt. Dies gelingt, indem beispielsweise für den Fall der Kranzdrehzahlen  $n_a = 5,4$  U/min und  $n_i = -16$  U/min der Bereich (das heißt  $\pm 0,1$  bis  $\pm 0,25$  U/min) der weiter oben angegebenen Drehzah-



len  $n_u$  und  $n_o$  für den oberen und unteren Polierteller vermieden werden. Für modifizierte Kombinationen für die Kranzdrehzahlen  $n_u$  und  $n_o$  verschieben sich die kritischen Werte, wobei in der Regel mit denselben Bahnfiguren zu rechnen ist. [0061] Diese Forderung, kritische Bahnkurven zu vermeiden, ist in den in den Fig. 7 bis 9 abgebildeten Bahnkurven erfüllt.

5 [0062] Geschlossene oder nahezu geschlossene Bahnkurven mit Schlaufenzahlen größer als sechs bedeuten de facto eine gleichmäßige Bedeckung der Poliertücher und sind im Rahmen der Erfindung unkritisch.

[0063] Eine zweite Bedingung, die für die Erfindung relevant ist, betrifft die im Verlauf einer Bahnkurve auftretenden Krümmungsradien. Wir fanden heraus, dass abrupte Richtungswechsel der Bahnkurve in Verbindung mit der an dieser Stelle stattfindenden Abbremsung der Relativbewegung insbesondere für die Erzielung hinreichend hoher Ebenheiten der Siliciumscheibe von Nachteil sind, insbesondere wenn die genannte Steigerung des Polierdrucks von beispielsweise 10 0,10 bis 0,15 bar auf 0,18 bis 0,25 bar durchgeführt wird. Bei Fahrweisen an der oberen Grenze des Druckbereiches kann es vorkommen, dass Siliciumscheiben durch Verkippung aus den Läuferscheiben gezogen werden, was unvermeidlich zum Bruch führt, wobei in der Regel nicht nur Siliciumscheiben und Poliertücher, sondern auch der Satz Läuferscheiben zerstört wird. Ein Beispiel für eine derartige Fahrweise ist in Fig. 4, Punkt 9 zu erkennen. Derart kritische Krümmungsradien der Bahnkurven können bei relativ niedrigen Poliertellerdrehzahlen ( $< 10 \dots 12$  U/min) sowie bei im Verhältnis zu 15 den Tellerdrehzahlen relativ hohen Rotationsgeschwindigkeiten der Läuferscheiben auftreten.

[0064] Daher sind für eine Erhöhung der Abtragsrate beim doppelseitigen Polieren, ohne Qualitätsverluste in Kauf nehmen zu müssen, neben geschlossenen Bahnkurven auch Krümmungsradien der Bahnkurven zu vermeiden, die niedriger sind als der Krümmungsradius der inneren Antriebskranzes 5. Es ist selbstverständlich, dass diese beiden Bedingungen gleichzeitig für die Bahnkurve relativ zum oberen und zum unteren Polierteller gelten müssen. Im Rahmen der Erfindung ist durch Anwendung der Gleichungen (20) und (21) eine präzise Vorhersage möglich, welche Bahnkurven beide genannten Bedingungen erfüllen. Es hat sich gezeigt, dass sich nur eine gewisse Auswahl der Vielzahl der möglichen Kombinationen aus  $n_o$ ,  $n_u$ ,  $n_a$  und  $n_i$ , die den Gegenstand der Erfindung bildet, aus den genannten Gründen in der betrieblichen Praxis bewährt.

25 [0065] Mit diesen die Erfindung charakterisierenden Bedingungen gelingt die doppelseitige Politur von Siliciumscheiden bei Bahngeschwindigkeiten  $v_o$  beziehungsweise  $v_u$  von  $\pm 1,0$  bis  $\pm 1,8$  m/sec und Drücken von 0,18 bis 0,25 bar mit typischen Abtragsraten von 0,8 und 1,5  $\mu\text{m}/\text{min}$ . Üblich bei Verfahren nach dem Stand der Technik bei gleichen Rahmenbedingungen sind gemäß der DE 199 05 737 C2 beispielsweise bei einem Druck von 0,15 bar eine Abtragsrate von 0,55  $\mu\text{m}/\text{min}$ .

30 [0066] Die Erfindung kann genutzt werden, indem von Vorderseite und Rückseite der Siliciumscheiden gleich viel Material abgetragen wird. Die gelingt mit einer gewissen Genauigkeit, wenn  $v_o$  und  $v_u$  annähernd gleich gewählt werden. Es kann durch geeignete Wahl von  $v_o$  und  $v_u$  jedoch auch mehr Material von einer Seite, beispielsweise von der Vorderseite, entfernt werden, um bei in Summe möglichst niedrigen Gesamtabträgen eine Entfernung von gestörten Kristallschichten und sonstiger Oberflächenfehler von der Vorderseite zu gewährleisten. Selbstverständlich können die optimierten Bahnkurven auch für den Einsatz von Bürstenscheiben zur Tuchreinigung oder mit Schleifkörpern belegter Trägerscheiben 35 zur Tuchkonditionierung verwendet werden, wenn eine Ausführung dieser Schritte gewünscht wird, um eine gleichmäßige Bearbeitung des oberen und unteren Poliertuchs zu gewährleisten.

[0067] Im Rahmen der hinsichtlich der Rotations- und Druckverhältnisse gemachten Ausführungen wird der doppelseitige Polierschritt einer dem Fachmann bekannten Art und Weise durchgeführt.

40 [0068] Bevorzugt wird mit einem handelsüblichen Polyurethan-Poliertuch einer Härte von 50 bis 100 (Shore A) poliert, das über eingearbeitete verstärkende Polyesterfasern verfügen kann. Im Falle der Politur von Siliciumscheiden empfiehlt sich die kontinuierliche Zuführung eines Poliermittels mit einem pH-Wert von bevorzugt 9,5 bis 12,5 aus bevorzugt 1 bis 5 Gew.-%  $\text{SiO}_2$  in Wasser.

[0069] Zur Beendigung des Polierschrittes muss die chemisch sehr reaktive hydrophobe Scheibenoberfläche passiviert werden. Im Rahmen der Erfindung erfolgt dies bevorzugt durch Zuführung einer Flüssigkeit oder nacheinander mehrerer 45 Flüssigkeiten, die einen oder mehrere filmbildende Stoffe enthalten, mit der Folge einer vollständigen Benetzung von polierter Vorderseite, Rückseite und Kante der Siliciumscheiden mit einem Flüssigkeitsfilm, wobei im Allgemeinen ein Konzentrationsbereich zwischen 0,01 und 10 Vol.-% von filmbildendem Stoff im Stoppmittel sinnvoll ist. Besonders bevorzugt ist der Einsatz eines in einer nachfolgenden Reinigung entfernbaren Stoffes oder mehrerer Stoffe aus einer Gruppe von Verbindungen, die ein- oder mehrwertige Alkohole, Polyalkohole und Tenside umfasst. Eine dasselbe Prinzip verwirklichende, ebenfalls besonders bevorzugte Ausführungsform des Stoppvorganges ist die Zuführung eines wässrigen Poliermittels auf  $\text{SiO}_2$ -Basis, das einen oder mehrere Stoffe aus den genannten Gruppen von Verbindungen in 50 Anteilen von 0,01 bis 10 Vol.-% enthält.

[0070] Die Siliciumscheiden werden nach Beendigung der Zuführung an Stoppmittel und gegebenenfalls Reinstwasser aus der Poliermaschine entnommen und nach dem Stand der Technik gereinigt und getrocknet. Es schließt sich eine Bewertung der Siliciumscheiden hinsichtlich durch den Polierschritt beeinflusster, durch den Weiterverarbeiter der Scheiben spezifizierter Qualitätsmerkmale nach dem Fachmann bekannten Methoden an. Derartige Merkmale können beispielsweise lokale Geometriedaten sein, die auf einem handelsüblichen, nach einem kapazitiven oder optischen Prinzip arbeitenden Messinstrument bestimmt werden können. Weitere bewertete Qualitätsmerkmale können die Vorderseite, 60 die Rückseite und/oder die Kante der Scheiben betreffende Eigenschaften sein. Hierbei kommt der visuellen Beurteilung des Auftretens und Umfanges von Kratzern, Flecken und sonstiger Abweichungen von der idealen Siliciumoberfläche des Auftretens und Umfanges von Kratzern, Flecken und sonstiger Abweichungen von der idealen Siliciumoberfläche unter stark gebündeltem Licht eine hohe Bedeutung zu. Darüber hinaus können beispielsweise Untersuchungen von Rauigkeit, Topologie und Metallkontamination auf handelsüblichen Messgeräten sinnvoll beziehungsweise gefordert sein.

[0071] Hinsichtlich dieser zur Scheibencharakterisierung herangezogenen Parameter weisen die erfindungsgemäß hergestellten Siliciumscheiden keine Nachteile gegenüber Siliciumscheiden auf, die nach dem Stand der Technik hergestellt wurden. Sie eignen sich für die Herstellung von Halbleiterbauelementen mit Linienbreiten gleich oder kleiner 0,13  $\mu\text{m}$ , insbesondere werden sehr hohe lokale Ebenheiten, ausgedrückt beispielsweise als  $\text{STQR}_{\text{max}}$  gleich oder kleiner 0,13  $\mu\text{m}$ , in Verbindung mit kratzerfreien Oberflächen erzielt. Auf Grund der mit der Erfindung möglichen Ausbringungssteige-



rung der Anlagen durch Optimierung der Bahnkurven und damit verbundener Steigerung der Abtragsraten zur gleichzeitig beidseitig Material abtragenden Bearbeitung der Halbleiterscheiben lassen sie sich allerdings um bis zu 40% kostengünstiger pro beidseitig Material abtragendem Prozessschritt beziehungsweise und bis zu 15% kostengünstiger mit Blick auf die Gesamt-Prozesskette als nach Verfahren gemäß dem Stand der Technik herstellen, was einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil bedeutet.

[0072] Abhängig von ihrer weiteren Bestimmung kann es notwendig sein, die Scheibenvorderseite einer Oberflächenschleifpolitur zur Erzielung einer schleierfrei polierter Vorderseite nach dem Stand der Technik zu unterziehen, beispielsweise mit einem weichen Poliertuch unter Zuhilfenahme eines alkalischen Poliermittels auf  $\text{SiO}_2$ -Basis unter Abtrag von 0,1 bis 1  $\mu\text{m}$  Silicium. Falls gewünscht, kann an einer beliebigen Stelle der Prozesskette eine Wärmebehandlung der Siliciumscheibe eingefügt werden, beispielsweise um thermische Donatoren zu vernichten, eine Störung von oberflächennahen Kristallschichten auszuheilen oder eine gezielte Dotierstoffverarmung herbeizuführen. Eine Reihe weiterer, für bestimmte Produkte erforderliche Prozessschritte wie die Aufbringung von Rückseitenbeschichtungen aus Polysilicium, Siliciumdioxid oder Siliciumnitrid oder die Aufbringung einer Epitaxieschicht aus Silicium oder weiteren halbleitenden Materialien auf die Vorderseite der Siliciumscheibe lässt sich ebenfalls nach dem Fachmann bekannten Verfahren an den geeigneten Stellen in die Prozesskette einbauen. Die Siliciumscheiben könne außerdem an verschiedenen Stellen der Prozesskette, beispielsweise vor dem Ätzen, mit einem eindeutigen Identifizierungsmerkmal, beispielsweise einer Lasermarkierung, beaufschlagt werden.

#### Vergleichsbeispiele und Beispiele

[0073] Vergleichsbeispiele und Beispiele betreffen die doppelseitige Politur von Siliciumscheiben mit einem Durchmesser von 300 mm im Produktionsmaßstab. Die Siliciumscheiben wurden nach dem Stand der Technik durch Drahtsägen eines Einkristalls, Kantenverrunden, beidseitiges sequenzielles Oberflächenschleifen, Ätzen in einem konzentrierten Salpetersäure/Flusssäure-Gemisch und Kantenpolieren hergestellt und besaßen eine Dicke von 805  $\mu\text{m}$ . Mit fünf Läuferscheiben aus rostfreiem Chromstahl der Dicke 770  $\mu\text{m}$ , deren je drei Aussparungen zur Aufnahme der Siliciumscheiben mit PVDF ausgekleidet waren, wurden die Siliciumscheiben bis zu einer Enddicke von 775  $\mu\text{m}$  poliert. Als Poliertuch fand ein handelsübliches Polyesterfaser-verstärktes Polyurethantuch der Härte 74 (Shore A) Verwendung. Das wässrige Poliermittel enthält 3 Gew.-%  $\text{SiO}_2$  und besaß einen pH-Wert von 11,5. Oberer und unterer Polierteller wurden jeweils auf 38°C temperiert.

[0074] Nach Beendigung der Politur wurde unter reduziertem Druck ein Stoppmittel zugeführt, das 1 Vol.-% Glycerin, 1 Vol.-% Butanol und 0,07 Vol.-% Tensid enthält. Nach Reinigung und Trocknung erfolgte eine visuelle Inspektion unter Hazelicht und eine Geometriemessung auf einem nach dem kapazitiven Prinzip arbeitenden Geometriemessgerät. Kriterien zur Weitergabe der so prozessierten Scheiben war die Abwesenheit von Oberflächenkratzern sowie eine lokale Ebenheit  $\text{SFQR}_{\text{max}}$  von 0,12  $\mu\text{m}$  für ein Flächenraster von 25 mm  $\times$  25 mm. Siliciumscheiben, welche diese Bedingungen nicht erfüllten, wurden nach dem Stand der Technik unter zusätzlichem Abtrag von 5  $\mu\text{m}$  Halbleitermaterial nachgearbeitet. Das Geometriemessgerät wurde auch zur Bestimmung der Dicke der Siliciumscheiben vor und nach der Politur verwendet, woraus sich die Abtragsrate des Poliervorganges bestimmen lässt. Die Verteilung des Abtrages auf Vorder- und Rückseite der Siliciumscheiben wurde durch Testscheiben bestimmt, die eine Lasermarkierung besaßen, deren Tiefe von und nach der Politur mikroskopisch vermessen wurde.

[0075] Nachfolgende Tabelle gibt die relevanten Prozessdaten für die Vergleichsbeispiele 1 bis 3 (= V1 bis V3; entsprechend den Bahnkurven in der Fig. 4 bis 6) und die Beispiele 1 bis 3 (= B1 bis B3 entsprechend den Bahnkurven in der Fig. 7 bis 9) an. Die erfinderische Bedingung (a) für die Bahnkurve bedeutet die Abwesenheit von geschlossenen oder nahezu geschlossenen Bahnkurven mit gleich oder kleiner sechs Schleifen; Bedingung (b) bedeutet die Abwesenheit von Krümmungsradien gleich oder kleiner dem Krümmungsradius des inneren Antriebskranzes. Beide Bedingungen müssen für die Bahnkurven der Siliciumscheiben relativ zum oberen und zum unteren Polierteller gelten.

Beispiel	$n_o$ (U/min)	$n_u$ (U/min)	$n_s$ (U/min)	$n_l$ (U/min)	$n_{\text{Lstrot}}$ (U/min)	$n_{\text{Lstrans}}$ (U/min)	$v_o$ (U/min)	$v_u$ (U/min)	erfüllte Bedingung
V1	+10,0	-10,0	+4,0	-19,0	13,34	-0,88	-0,71	+0,69	(a)
V2	+13,3	-11,6	+5,4	-16,0	12,41	+0,86	-0,81	+0,90	(b)
V3	+19,5	-15,7	+5,4	-16,0	12,41	+0,86	-1,22	+1,17	(b)
B1	+16,0	-13,0	+5,4	-16,0	12,41	+0,86	-0,99	+0,99	(a) + (b)
B2	+20,0	-20,0	+4,0	-19,0	13,34	-0,88	-1,37	+1,35	(a) + (b)
B3	+23,0	-15,5	+4,0	-19,0	13,34	-0,88	-1,57	+1,05	(a) + (b)

[0076] Mit den aufgeführten Prozessbedingungen wurden größere Mengen an Siliciumscheiben prozessiert. Dabei wurde zunächst bei niedrigerem Druck poliert und anschließend bei höherem Druck. Für jede Versuchsreihe wurde ein neues Poliertuch verwendet, um gleiche Ausgangsbedingungen zu gewährleisten. Die nachfolgende Tabelle enthält die Ergebnisse hinsichtlich der mittleren Abtragsraten und der Scheibenqualität nach der Reinigung. VS = Vorderseite; RS = Rückseite der Siliciumscheiben. Bei den relativen Prozesskosten ist eine Nachpolitur nicht spezifikationsgerechter Scheiben berücksichtigt.

	Bei- spiel	Polier- druck (bar)	Abtrags- rate ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	Abtragsver- teilung VS/RS ( $\mu\text{m}$ )	SFQR <sub>max</sub> $\leq 0,12 \mu\text{m}$	Oberflä- chenkratzer	relative Prozess- kosten
5	V1	0,125	0,48	15/15	ja	nein	1,15
		0,150	0,54	15/15	ja	vereinzelt	1,24
		0,200	0,68	nicht bestimmt	nein	ja	>> 1
10	V2	0,150	0,58	14,5/15,5	nein	ja	>> 1
15	V3	0,125	0,58	15/15	ja	nein	1,00
		0,150	0,63	15/15	80 %	nein	1,21
		0,200	0,82	nicht bestimmt	nein	ja	>> 1
20	B1	0,150	0,67	15/15	ja	nein	0,90
	B2	0,125	0,66	15/15	ja	nein	0,89
		0,150	0,79	nicht bestimmt	ja	nein	0,81
		0,200	1,02	15/15	ja	nein	0,68
25	B3	0,225	1,10	nicht bestimmt	95 %	nein	0,72
		0,150	0,76	16,5/13,5	ja	nein	0,82
		0,200	0,97	17/13	ja	nein	0,71

30 [0077] Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass das erfindungsgemäße Verfahren zur doppelseitigen Politur von Siliciumscheiben insbesondere bei Verwendung von Polierdrücken von gleich oder größer als 0,15 bar deutliche Kostenvorteile gegenüber Verfahren nach dem Stand der Technik aufweist.

#### Patentansprüche

- 35 1. Verfahren zur gleichzeitig beidseitigen Material abtragenden Bearbeitung von Halbleiterscheiben (H) mit einer Vorderseite und einer Rückseite, wobei die Halbleiterscheiben (H) in mittels eines ringförmigen äußeren (6) und eines ringförmigen inneren (5) Antriebskranzes in Rotation versetzten Läuferscheiben (1) liegen und zwischen zwei gegenläufig rotierenden Arbeitsscheiben (7) in einer Weise bewegt werden, die sich durch je eine Bahnkurve eines Punktes (P) der Halbleiterscheiben relativ zur oberen Arbeitsscheibe und eine Bahnkurve dieses Punktes relativ zur unteren Arbeitsscheibe beschreiben lässt, **dadurch gekennzeichnet**, dass die beiden Bahnkurven
- 40 (a) nach sechs Schlaufen um die Zentrumsachse (M) der Poliermaschine ein noch offenes Erscheinungsbild besitzen und
- (b) an jeder Stelle einen Krümmungsradius aufweisen, der mindestens so groß ist wie der Radius (r) des inneren Antriebskranzes (5).
- 45 2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die gleichzeitig beidseitige Material abtragende Bearbeitung als doppelseitige Politur zwischen zwei mit Poliertuch bedeckten Poliertellern unter Abtrag von mindestens 2  $\mu\text{m}$  Halbleitermaterial ausgeführt wird.
- 50 3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Halbleiterscheiben (H) in mit Kunststoff von im Wesentlichen gleicher Dicke wie die Läuferscheibe (1) ausgekleideten Aussparungen (3) von mehreren ebenen Läuferscheiben (1) aus Stahl liegen, deren mittlere Dicke um 2 bis 20  $\mu\text{m}$  geringer bemessen ist als die mittlere Dicke der fertig polierten Halbleiterscheiben (H).
4. Verfahren nach Anspruch 2 oder Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Abtragsrate an Halbleitermaterial mindestens 0,65  $\mu\text{m}/\text{min}$  beträgt.
- 55 5. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die mittlere Dicke der Läuferscheiben (1) um 3 bis 10  $\mu\text{m}$  geringer bemessen ist als die mittlere Dicke der fertig polierten Halbleiterscheiben (H) und der Abtrag an Halbleitermaterial 5 bis 50  $\mu\text{m}$  beträgt.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens drei Halbleiterscheiben (H) gleichzeitig poliert werden und mindestens drei Läuferscheiben (1) gleichzeitig zum Einsatz kommen.
- 60 7. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass ein im Wesentlichen aus Polyurethan bestehendes unteres und oberes Poliertuch mit einer Härte von 50 bis 100 (Shore A) zum Einsatz kommt und ein Poliermittel mit einem  $\text{SiO}_2$ -Feststoffgehalt von 1 bis 5 Gew.-% und einem pH-Wert von 9,5 bis 12,5 kontinuierlich zugeführt wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass durch Wahl vergleichbarer mittlerer Bahngeschwindigkeiten von Halbleiterscheiben (H) relativ zum oberen und zum unteren Polierteller (7) von einer Vorderseite und einer Rückseite annähernd gleich viel Material abgetragen werden.
- 65 9. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass durch Wahl einer höheren mittleren Bahngeschwindigkeit von Halbleiterscheiben (H) relativ zum oberen Polierteller (7) verglichen mit der mittleren

Bahngeschwindigkeit relativ zum unteren Polierteller (7) von einer Vorderseite der Halbleiterscheiben (II) mehr Material abgetragen wird als von einer Rückseite.

10. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die gleichzeitig beidseitige Material abtragende Bearbeitung als doppelseitiger Läppschrift zwischen zwei Läppscheiben unter Abtrag von mindestens 10 µm Halbleitermaterial ausgeführt wird.

11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Halbleiterscheiben (II) in mit Kunststoff ausgekleideten Aussparungen (3) von ebenen Läuferscheiben (1) aus Stahl liegen und sich unter Zuführung einer Abrasivteilchen enthaltende Suspension zwischen zwei Läppscheiben aus Stahl mit kanalartigen Vertiefungen bewegen.

12. Verfahren nach Anspruch 10 oder Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass von einer Vorderseite und einer Rückseite gleich viel Material abgetragen werden.

13. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die gleichzeitig beidseitige Material abtragende Bearbeitung als doppelseitiger Schleifschrift zwischen zwei mit Schleifkörpern belegter Arbeitsscheiben (7) unter Abtrag von mindestens 10 µm Halbleitermaterial ausgeführt wird.

14. Verwendung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 13 innerhalb einer Prozesskette zur Herstellung von Halbleiterscheiben aus Silicium mit einer lokalen Ebenheit  $SFQR_{\max}$  von gleich oder kleiner 0,13 µm, bezogen auf eine Bauelementefläche von 25 mm × 25 mm.

Hierzu 9 Seite(n) Zeichnungen

Fig. 1

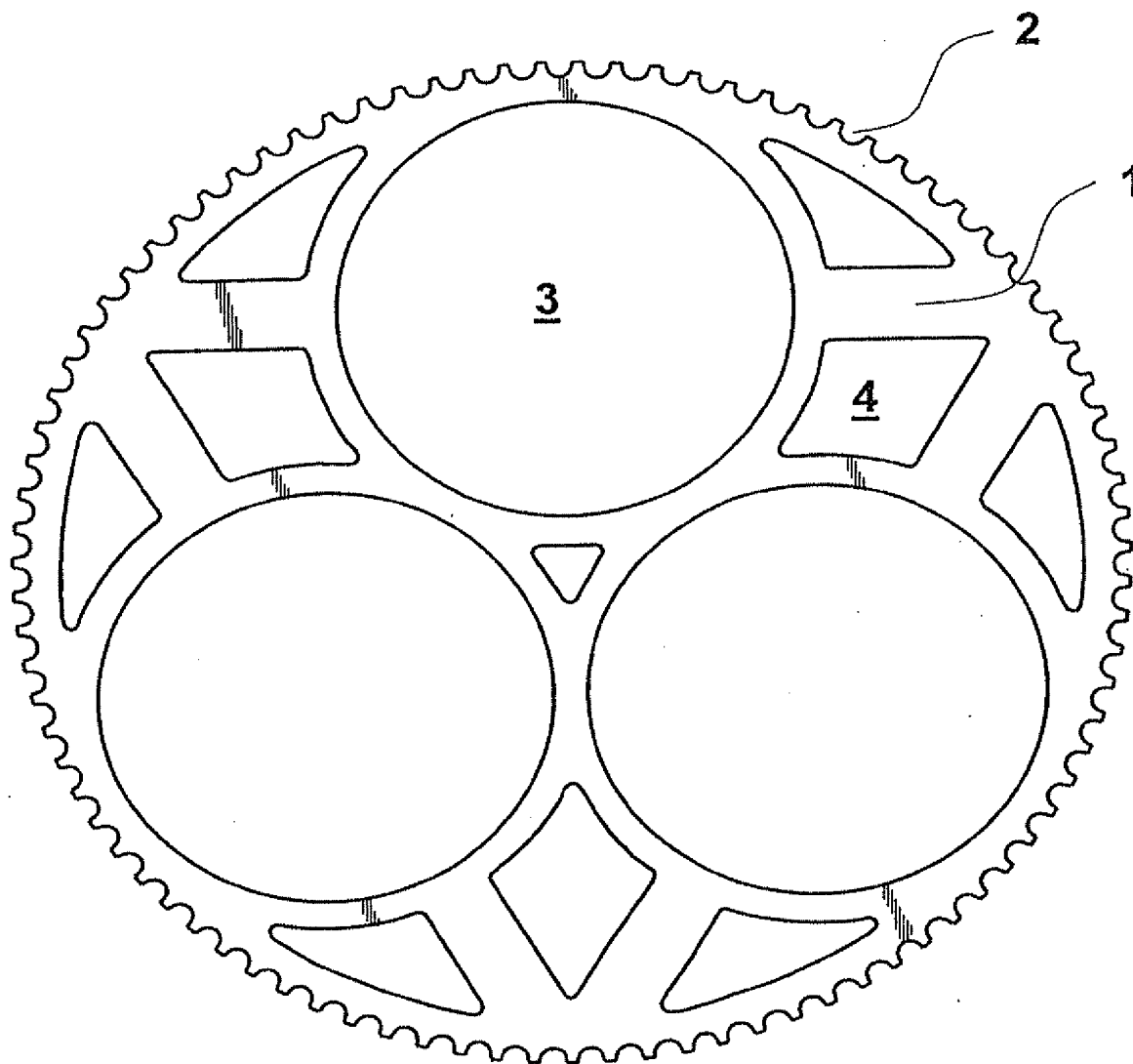


Fig. 2

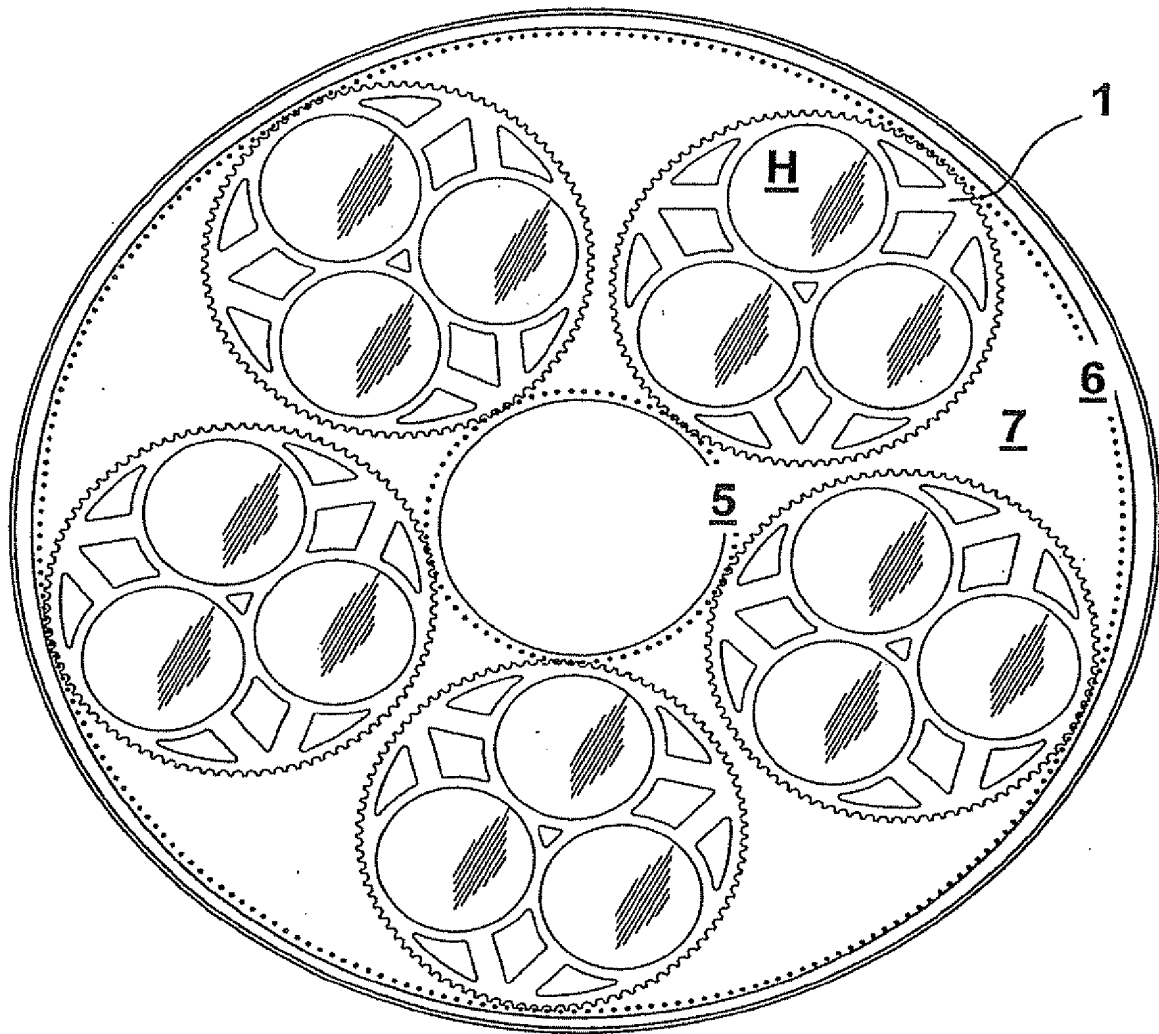


Fig. 3

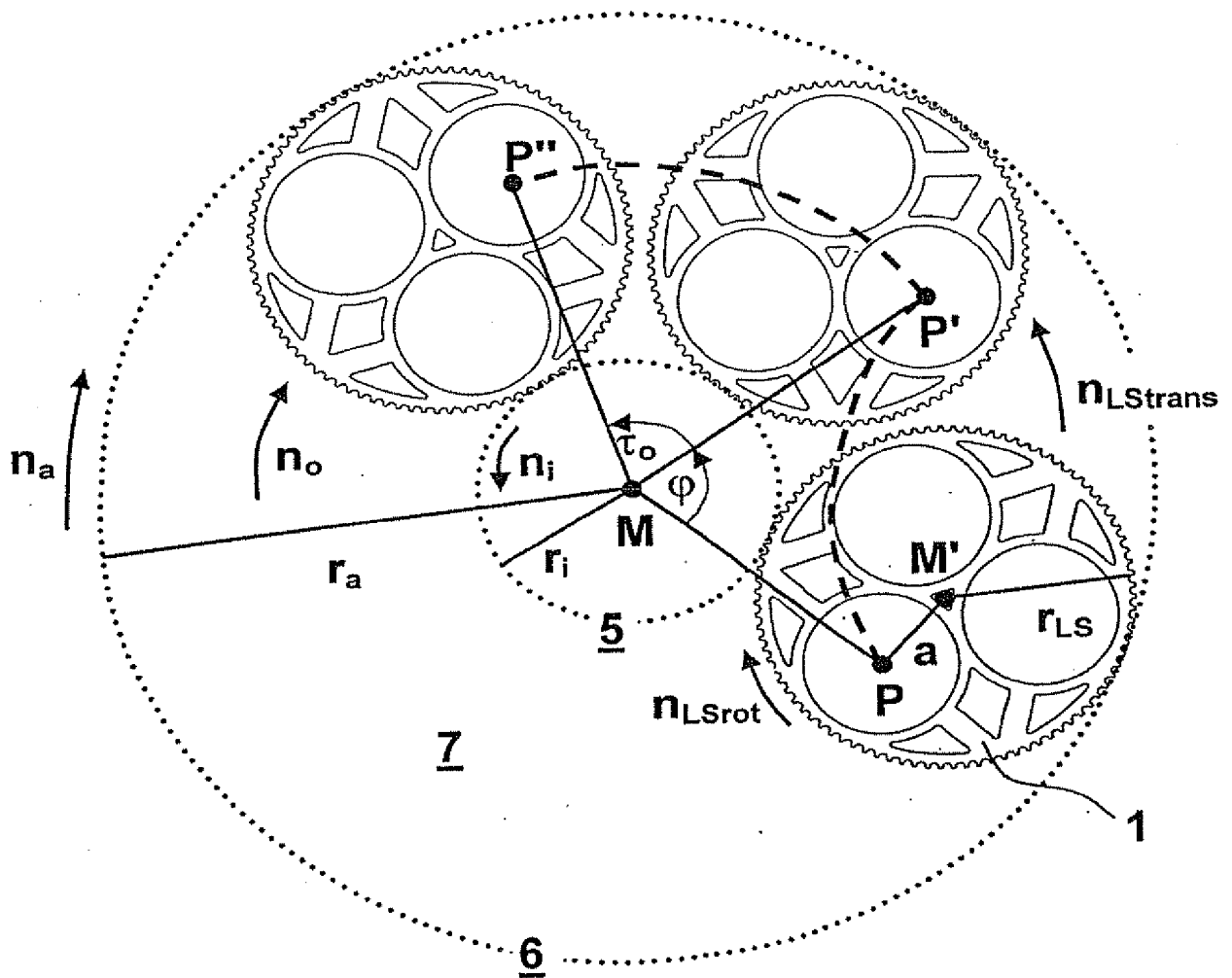
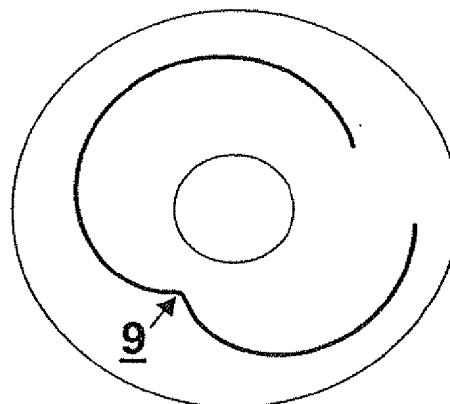
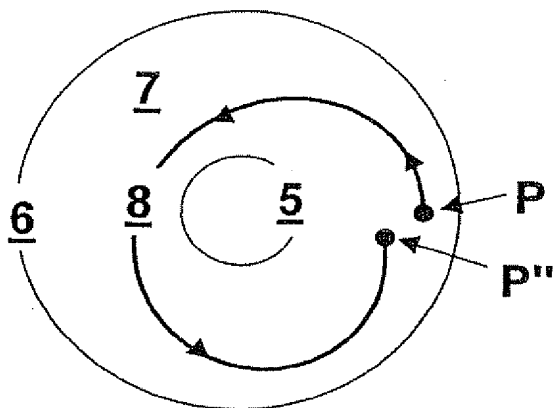
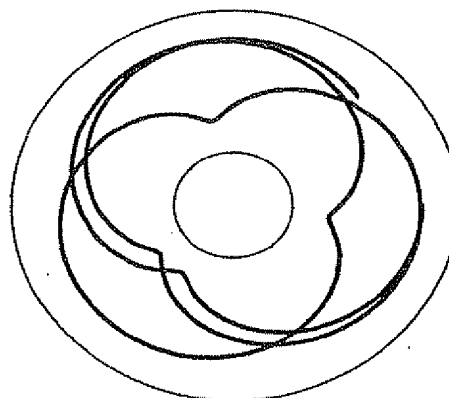
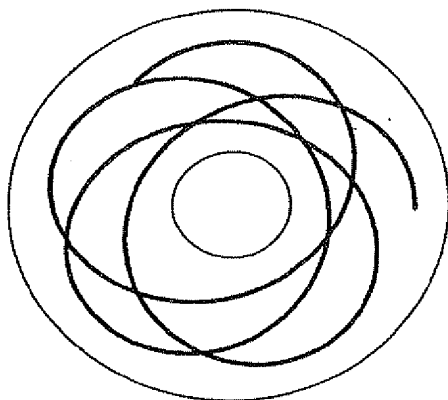


Fig. 4

$n_o = 10 \text{ U/min}$ ;  $n_u = -10 \text{ U/min}$ ;  $n_a = 4 \text{ U/min}$ ;  $n_i = -19 \text{ U/min}$

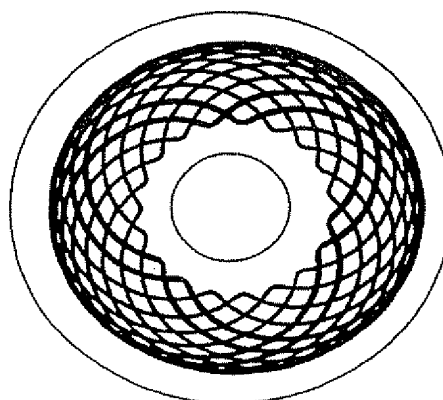
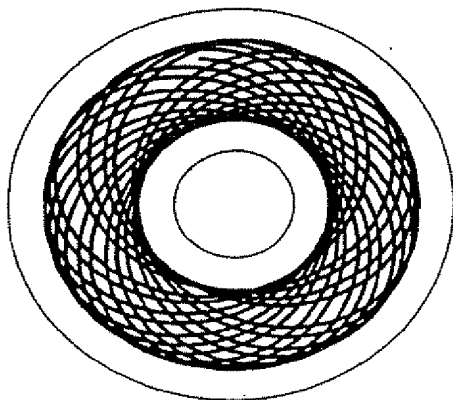


Bahnkurve relativ zum oberen Teller / Bahnkurve relativ zum unteren Teller  
nach 6 sec



nach 20 sec

nach 20 sec



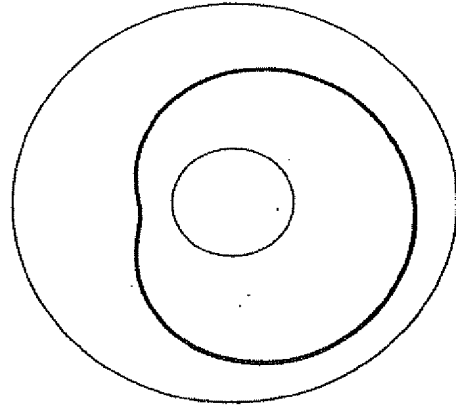
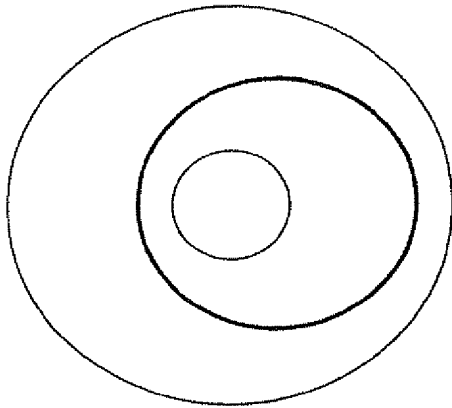
nach 120 sec

nach 120 sec

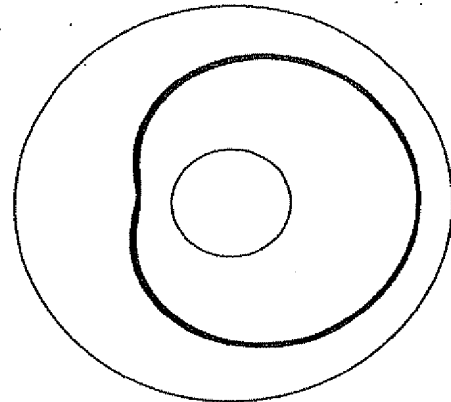
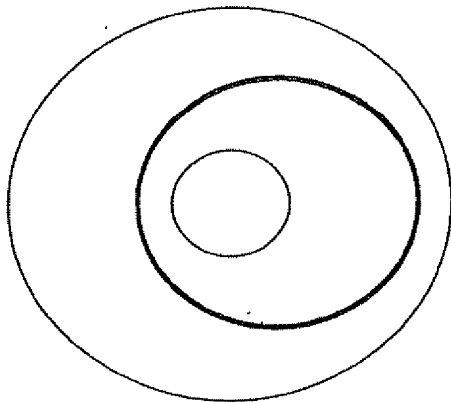


Fig. 5

$n_o = 13,3 \text{ U/min}$ ;  $n_u = -11,6 \text{ U/min}$ ;  $n_a = 5,4 \text{ U/min}$ ;  $n_i = -16 \text{ U/min}$

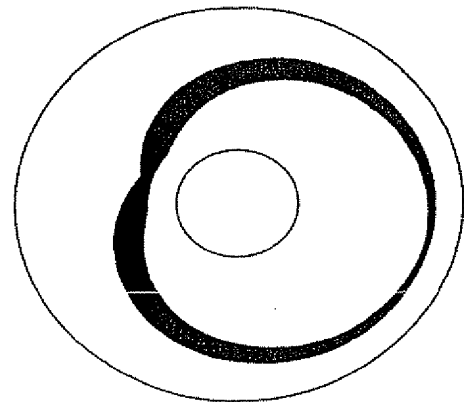
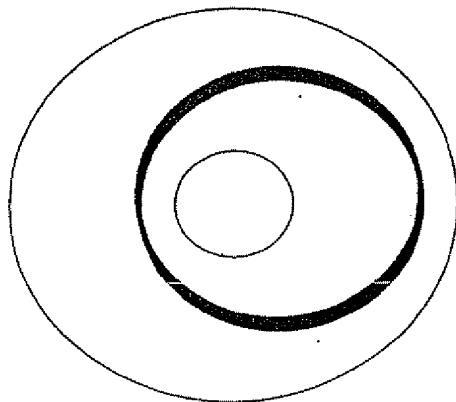


Bahnkurve relativ zum oberen Teller / Bahnkurve relativ zum unteren Teller  
nach 6 sec



nach 20 sec

nach 20 sec

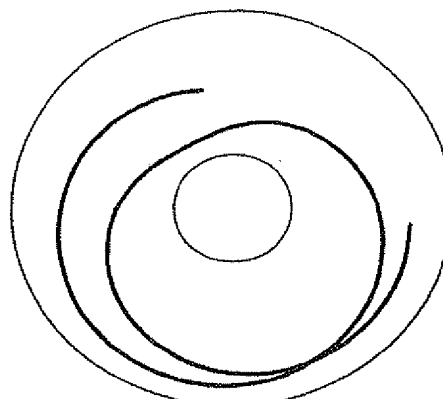
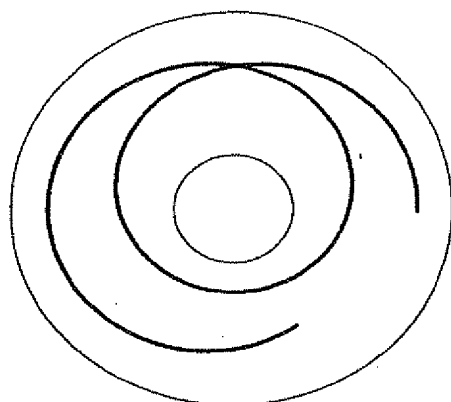


nach 120 sec

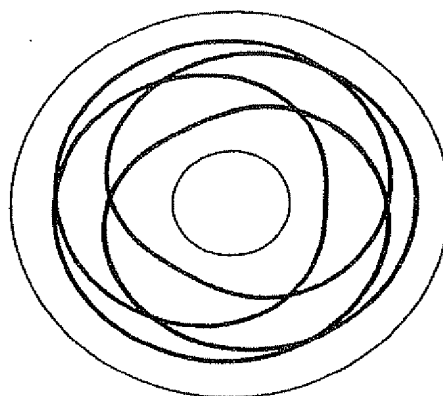
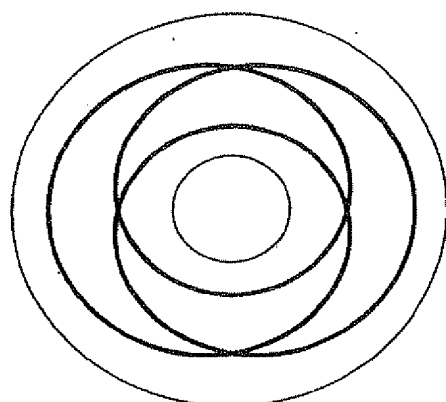
nach 120 sec

Fig. 6

$n_o = 19,5 \text{ U/min}$ ;  $n_u = -15,7 \text{ U/min}$ ;  $n_a = 5,4 \text{ U/min}$ ;  $n_i = -16 \text{ U/min}$

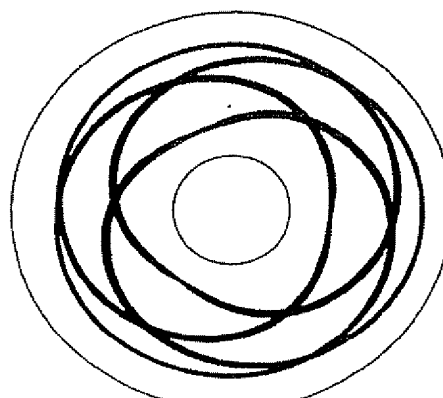
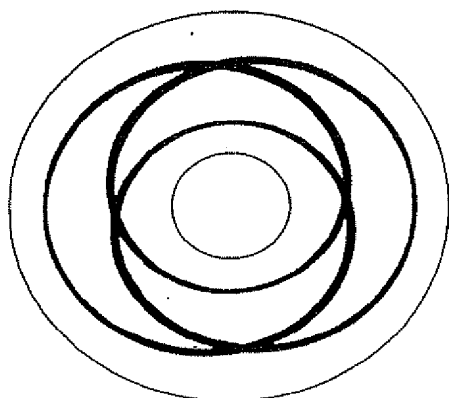


Bahnkurve relativ zum oberen Teller / Bahnkurve relativ zum unteren Teller  
nach 6 sec



nach 20 sec

nach 20 sec

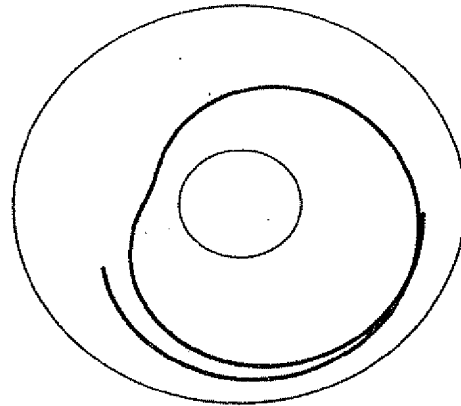
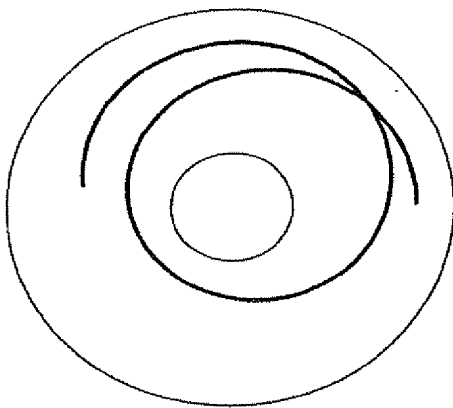


nach 120 sec

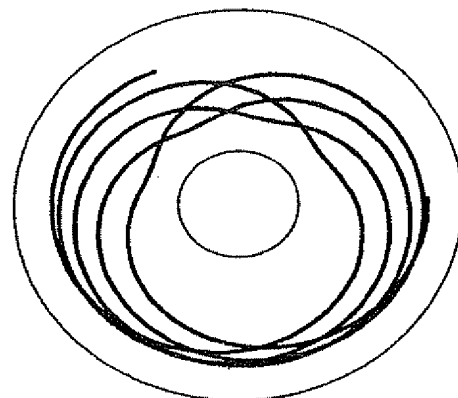
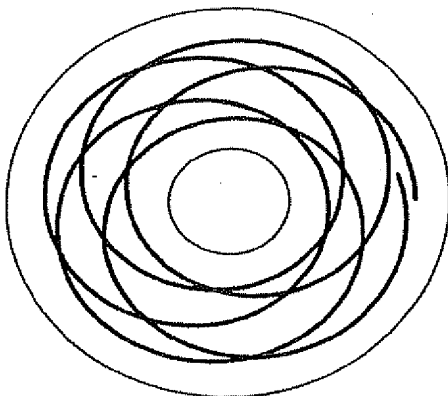
nach 120 sec

Fig. 7

$n_o = 16 \text{ U/min}$ ;  $n_u = -13 \text{ U/min}$ ;  $n_a = 5,4 \text{ U/min}$ ;  $n_i = -16$

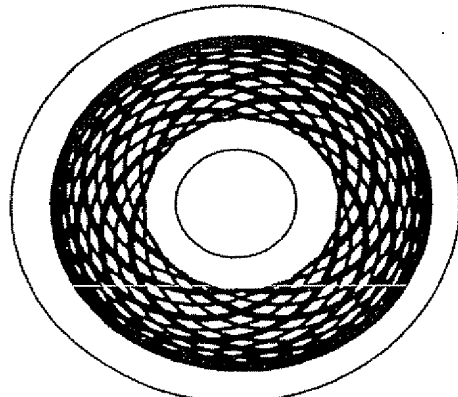
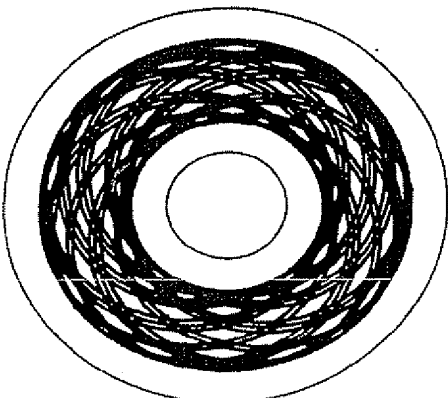


Bahnkurve relativ zum oberen Teller / Bahnkurve relativ zum unteren Teller  
nach 6 sec



nach 20 sec

nach 20 sec

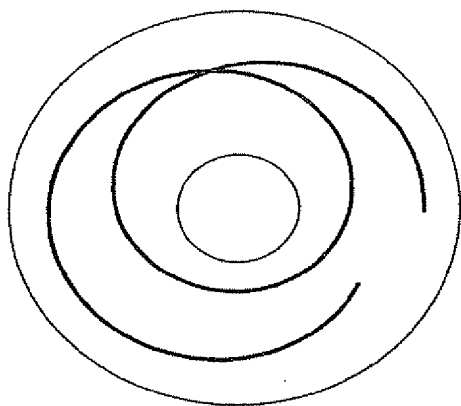


nach 120 sec

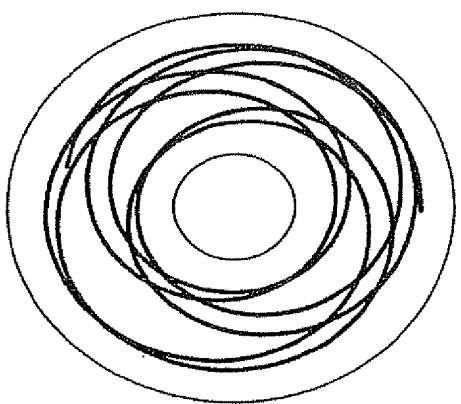
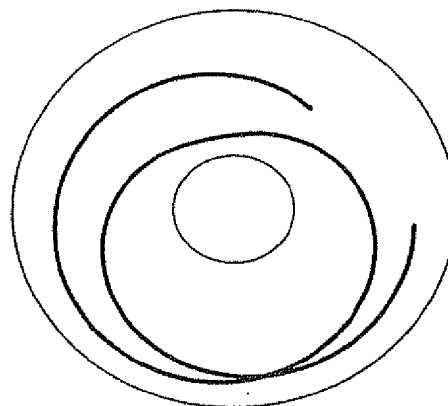
nach 120 sec

Fig. 8

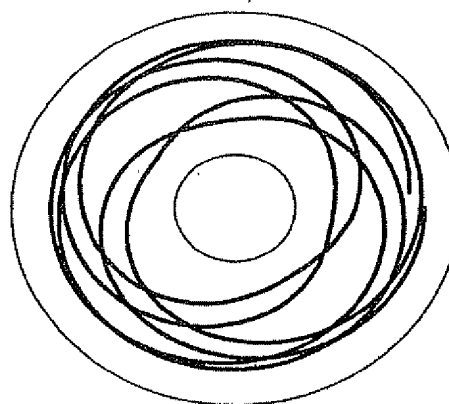
$n_o = 20 \text{ U/min}$ ;  $n_u = -20 \text{ U/min}$ ;  $n_a = 4 \text{ U/min}$ ;  $n_i = -19 \text{ U/min}$



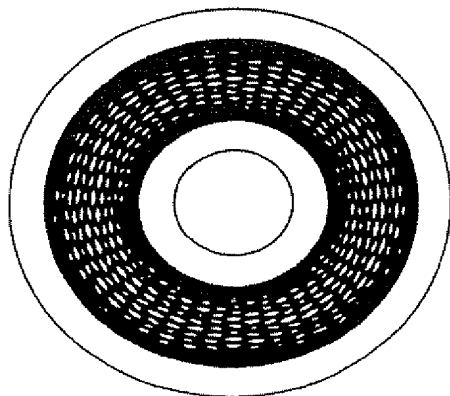
Bahnkurve relativ zum oberen Teller / Bahnkurve relativ zum unteren Teller  
nach 6 sec



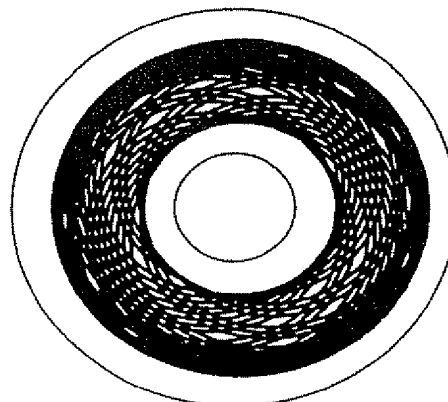
nach 20 sec



nach 20 sec



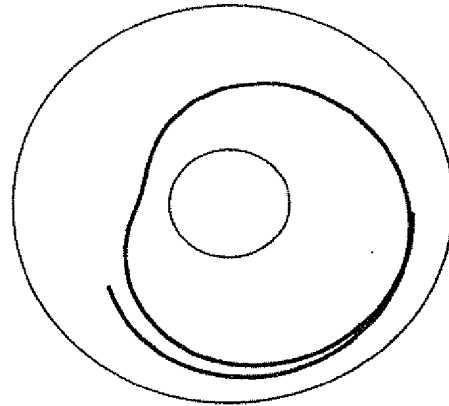
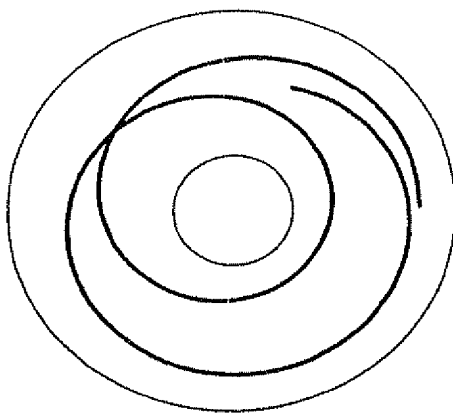
nach 120 sec



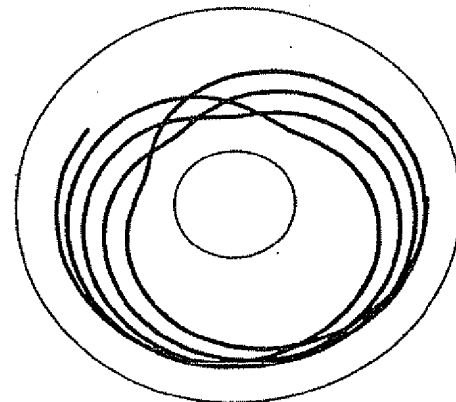
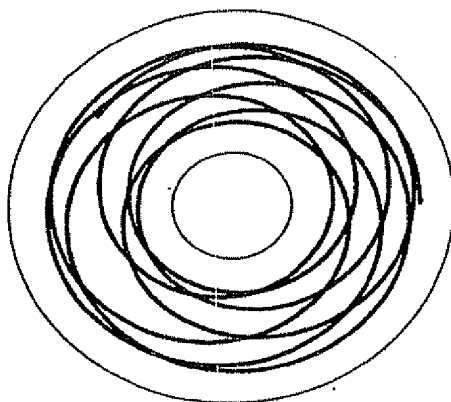
nach 120 sec

Fig. 9

$n_o = 23 \text{ U/min}$ ;  $n_u = -15,5 \text{ U/min}$ ;  $n_a = 4 \text{ U/min}$ ;  $n_i = -19 \text{ U/min}$

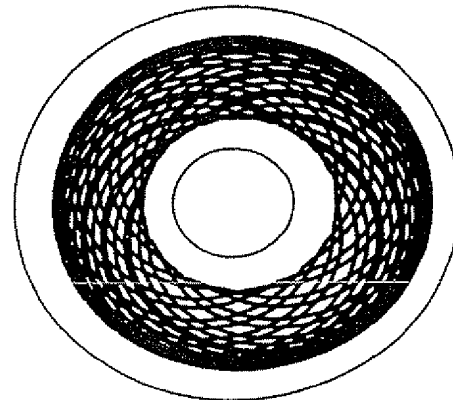
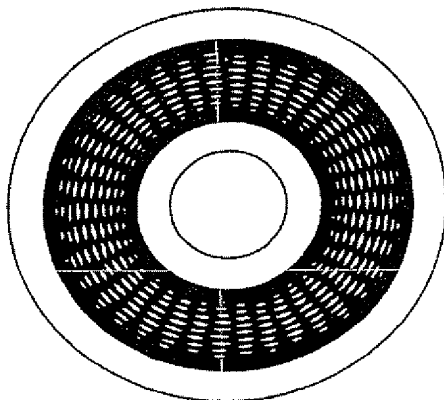


Bahnkurve relativ zum oberen Teller / Bahnkurve relativ zum unteren Teller  
nach 6 sec



nach 20 sec

nach 20 sec



nach 120 sec

nach 120 sec